



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA

MECÁNICA ELÉCTRICA

“Diseño de sistema generador de vapor saturado con gasificación de carbón para mejorar eficiencia e impacto medio ambiental para la empresa Escobedo Sandoval S.A.C.”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTOR:

Fernandez Laiza Elky Loander (ORCID: 0000-0002-1478-2387)

ASESOR:

Ing. Paredes Rosario Raúl (ORCID: 0000-0002-3032-3527)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, Transmisión y Distribución de energía

TRUJILLO – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, por todo su apoyo brindado. Así mismo a mis hermanos, por el apoyo brindado en todo momento. Por último, a todas las personas cercanas por el aliento a lo largo de mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por darme la fuerza para poder culminar una meta muy importante en mi vida. En segundo lugar, a mis padres y a mis familiares por su ayuda incondicional y constante cooperación. Y en tercer lugar a mis docentes, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi preparación profesional.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICACIÓN	iv
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. MÉTODO.....	17
2.1. Tipo y diseño de investigación:.....	17
2.2. Variables y operacionalización:	17
2.3. Población, muestra y muestreo:	18
2.4. Técnicas e instrumentación de recolección de datos:.....	18
2.5. Procedimiento:	19
2.6. Método de análisis de datos:.....	20
2.7. Aspectos éticos:.....	20
III. RESULTADOS	21
3.1. Desarrollo del primer objetivo para hallar la eficiencia actual del caldero.....	22
3.2. Desarrollo del objetivo de diseño de caldera.....	23
3.3. Desarrollo de los objetivos de selección de equipos.....	24
3.4. Desarrollo de objetivo económico del sistema generador de vapor saturado.....	25
3.5. Plan de Mantenimiento del sistema generador de vapor saturado de la empresa Escobedo Sandoval SAC.....	27
IV. Discusión.....	31
V. Conclusiones.....	35
VI. Recomendaciones.....	37
VII. Referencias.....	38
VIII. ANEXOS.....	42
Diseño de configuración:	46
Rendimiento de la caldera.....	51
Método de manera directa.....	51

Método de manera indirecta:.....	52
Ratio de la combustión.....	52
Temperatura de los gases calientes y temperatura del hogar	52

Índice de tablas

Tabla 1. Técnica y Recolección de datos.	18
Tabla 2. Validación de instrumento por el experto.	19
Tabla 3. Caldera actual vs caldera de 60 BHP	22
Tabla 4. Características del diseño de caldera.....	23
Tabla 5. Selección de equipos de ablandador.....	24
Tabla 6. Selección de equipos de ablandador.....	24
Tabla 7. Selección de equipos de ablandador.....	25
Tabla 8. Presupuesto del diseño de caldera.	25
Tabla 9. Plan de mantenimiento	27
Tabla 10. Operacionalización de variables.....	42
Tabla 11. Criterios de evaluación para estos tres conceptos de diseños.	44
Tabla 12. Puntajes de evaluación para estas tres alternativas de diseños.....	44
Tabla 13. Conceptos alternativos de selección de diseño ganador.....	45
Tabla 14. Criterios de evaluación para las tres configuraciones.	46
Tabla 15. Puntajes de evaluación para las tres configuraciones.....	46
Tabla 16. CONCEPTO ALTERNATIVOS	47
Tabla 17. Molecular mass, stoichonometric air fuel ratios, and produc mole fraction and quality.	59
Tabla 18. curva del coeficiente de termodinámica de las propiedades de combustión	62
Tabla 19. entalpia de formación, entropía, baja y alta temperatura de combustión, y máxima energía de combustión.	63
Tabla 20. Las propiedades del aire a diferentes temperaturas se obtienen de la Tabla A.15	64

Tabla 21. tabla de propiedades físicas de los gases de combustión.	69
Tabla 22. estructura de acero americano, especificaciones y equivalentes.	79
Tabla 23. características del acero.....	80
Tabla 24. Variacion de resina y consumo de salmuera.	86
Tabla 25. Regeneracion de Resina.	86
Tabla 26. clasificación de la dureza del agua.....	87
Tabla 27. ficha técnica del gasificador de carbón	88
Tabla 28. composición del gasificado.	89
Tabla 29. ficha técnica de quemadores	90
Tabla 30. Ficha tecnica del scrubber.....	93
Tabla 31. Quemadores de Combustible para caldera	94
Tabla 32. características técnicas de quemador.....	94
Tabla 33. parametros de normas asme en la pg5.....	95

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de producción Escobedo Sandoval S.A.....	47
Figura 2. Propuesta del nuevo Proceso de producción Escobedo Sandoval S.A.....	47
Figura 3. Caldera tipo vertical de carbón	48
Figura 4. Caldera Pirotubular	48
Figura 5. Caldera pirotubular vertical.	49
Figura 6. Caldera pirotubular posicionamiento vertical	50
Figura 7. Caldera pirotubular vertical con quemador horizontal.	50
Figura 8. Caldera pirotubular vertical con alimentación manual de carbón.....	51
Figura 9. Caldera Pirotubular Vertical.	75
Figura 10. diseño intercambiador de calor.	77
Figura 11. Disposición de tubos alrededor del hogar	79
Figura 12. Ficha técnica de tanque.....	87
Figura 13. caldera.....	90
Figura 14. ciclo de quemado.	93
Figura 15. quemador	95

RESUMEN

El presente trabajo de esta tesis, ha consistido en diseñar un nuevo sistema de generación de vapor saturado para la empresa Escobedo Sandoval SAC. Donde se detalla el diseño de una caldera pirotubular de 30 BHP en posición vertical, por medio de parámetros y normas ingenieriles, donde se recurrió a la normativa ASME, donde se ha referenciado las secciones IV, VII Y IX, asimismo se tomó las normativas peruanas que acogen la norma NTP 350.300.2001.

Para determinar el diseño de la caldera se usó el método de generación de conceptos, asimismo también se creó el diseño configuración para poder elegir el diseño más conveniente para la realización de dicha propuesta.

Se obtuvo una caldera de 30 BHP de capacidad, con 180 tubos distribuidos en 5 pasos, de 1.2 m de diámetro y de largo 2.4 m. Este sistema de generación de vapor saturado, además de selección de equipos que son, un ablandador, para el tratamiento de agua de la caldera para evitar su corrosión, también se seleccionó un gasificador de carbón antracita, donde se realizar el proceso de pirolisis, ayudando así a disminuir gran porcentaje de emisión de gases al medio ambiente, además se plantea como mejora de prendido de caldera ya que de acá se obtendrá un producto en forma de gas, la cual el prendido de caldera será más rápido, para disminuir los gases liberados por la chimenea se plantea como solución un scrubber, que básicamente se describe como un lavador de humos.

Además, se tendrá un plan de mantenimiento que son planteados de la siguiente manera: el mantenimiento diario, mensual y semestral que se describe en una tabla en la sección de resultados, así como el detalle económico del sistema de generación de vapor saturado.

Por último, se realizará planos el diseño de la caldera mediante el software de solidworks, acompañado de sus planos.

Palabras clave: caldera, diseño, eficiencia, vapor.

ABSTRACT

The present work of this thesis has consisted of designing a new saturated steam generation system for the Escobedo Sandoval SAC company. Where the design of a 30 BHP fire tube boiler in a vertical position is detailed, by means of engineering parameters and standards, where the ASME regulations were used, where sections IV, VII and IX have been referenced, the Peruvian regulations were also taken that accept the NTP 350.300.2001 standard.

The concept generation method was used to determine the boiler design, and the configuration design was also created to be able to choose the most convenient design for the realization of said proposal.

A 30 BHP capacity boiler was obtained, with 180 tubes distributed in 5 steps, 1.2 m in diameter and 2.4 m long. This saturated steam generation system, in addition to the selection of equipment that is, a softener, for the treatment of boiler water to avoid its corrosion, an anthracite coal gasifier was also selected, where the pyrolysis process will be carried out, helping Thus, to decrease a large percentage of gas emissions to the environment, it is also proposed as an improvement in boiler ignition since here a product in the form of gas will be obtained, which will ignite the boiler faster, to decrease the gases released a scrubber is proposed as a solution for the chimney, which is basically described as a smoke scrubber.

In addition, there will be a maintenance plan that is presented as follows: daily, monthly and semi-annual maintenance described in a table in the results section, as well as the economic details of the saturated steam generation system.

Finally, the design of the boiler will be made using solidworks software, accompanied by their plans.

Keywords: boiler, design, efficiency, steam.

I. INTRODUCCIÓN

A inicios del siglo XX, las máquinas de vapor se usan para extraer agua de las minas. En 1765 James Watt mejoro la maquina a vapor de Newcomen, introduciendo una mejora en la en la máquina de vapor dándole usos múltiples, la cual esta máquina era un recipiente cilíndrico que se calentaba por abajo por medio de una hoguera. Esta máquina revoluciono el sector industrial como la mecánica, textil, metalúrgica, etc. Más adelante se pensó en producir vapor para transporte, por la cual se crearon los buques de vapor.

En las últimas décadas el empleo de sistemas de vapor para las industrias cumple un rol importante para realizar distintos trabajos, En el Perú existen grandes obstáculos económicos y tecnológicos para el desarrollo de equipos y producto, por lo cual las empresas dedicados a ellos se ven en la obligación de diseñar sus productos de manera empírica.

Por la cual este estudio se basará en el sector industrial de los calderos, donde se abarcado un gran campo de construcción de calderos artesanales sin ningún tipo de estudio que favorezca tanto al propietario como al medio ambiente ya que estos calderos su principal combustible es el carbón. Debido al costo y las ventajas que presenta una caldera pirotubular se elije para nuestro diseño ya que tiene grandes puntos a su favor mencionados anteriormente.

En esta investigación se plantea la construcción de un producto bajo el protocolo de normas nacionales e internacionales, para operar la caldera sin temor a algún riesgo de fabricación que puede ser una explosión o una ruptura del material de caldera pudiendo ocasionar pérdidas humanas como económicas por la cual como ya se dijo anteriormente se busca satisfacer mediante un diseño normado obtener un producto de buena calidad.

Existen diversos sistemas de generación de vapor los cuales varían en función del combustible, la potencia, la aplicación, etc. El ciclo Rankin es el más utilizado en la industria de generación de vapor, este proceso termodinámico utiliza el agua como fluido de trabajo donde evapora y condensa.

El uso de carbón como combustible para caldera, una gran desventaja Es la cantidad de emisión de agentes contaminantes al medio ambiente. El metano obtenido del procedo de gasificación del carbón presentan grandes ventajas en comparación con otros combustibles.

Es por eso que se formula el problema, ¿De qué manera se puede plantear el diseño de un sistema generador de vapor saturado con gasificación de carbón para mejorar eficiencia e impacto medio ambiental para la empresa Escobedo Sandoval S.A.C.?

Hoy en día las calderas Pirotubulares son objetos de estudio y de mejoras, por la cual en este proyecto de investigación se realiza un diseño de caldera que está enfocada en la seguridad del personal que trabaja en el caldero, como a la misma vez se cuidara el medio ambiente reduciendo la emisión de gases contaminantes al medio ambiente, a base de normas de construcción de calderos.

El objetivo del presente trabajo de investigación es diseñar un sistema generador de vapor saturado con gasificación de carbón para mejorar eficiencia e impacto medio ambiental de la empresa Escobedo Sandoval. Así mismo, el primer objetivo específico a evaluar en el sistema de las variables eficiencia e impacto medio ambiental, luego segundo objetivo diseñar el sistema generación de vapor saturado: caldera, por tercer paso tenemos la selección de gasificador, ablandador y scrubber. Como cuarto paso tenemos, realizar análisis económico: costo de fabricación de caldera, y finalmente planificar el mantenimiento del sistema generador de vapor. Mediante el planteamiento del diseño de un sistema generador de vapor saturado con gasificación de carbón para mejorar eficiencia e impacto medio ambiental para la empresa Escobedo Sandoval S.A.C se planteará la construcción de la caldera más adecuada y de acuerdo a normas nacionales e internacionales.

Marco teórico

La comunidad de Madrid, en su artículo de funcionamiento de las calderas de vapor eficientes, da a conocer que el agua de alimentación a caldera, deberá estar por encima de los 110°C, las temperaturas de humos que emiten son muy altas, emitiendo así una energía, por el cual mediante un economizador se puede recuperar hasta un 20% de esta energía por lo cual también los gases emitidos reducen su contaminación y al mismo tiempo se mejora la eficiencia del caldero. Asimismo, Sanz y Patiño (2014), Menciona en su libro manual práctico de operador de calderas, que mediante la instalación de aparatos descalificadores y desmineralización para el tratamiento del agua se evitará que el encalichamiento se adhiera a los tubos de humo, por la cual se obtendrá mayor eficiencia de la caldera, además reducirá costos de mantenimiento y evitará la corrosión. Además, agrega que un condensador aumentara la eficiencia y disminución de gases. En Nicaragua, Uribazo (2012), realizó un estudio sobre “Investigación de la Contaminación Ambiental en el Entorno de Calderas del Municipalidad de Managua - Nicaragua”, con la finalidad de investigar cual es impacto ambiental que originan las emisiones de las chimeneas de calderas pertenecientes al Hospital Militar de Managua, esto como consecuencia de los reclamos de los pobladores del Barrio Francisco Meza Rojas Sur, pues aducían que existían emisiones de Hollín, pero es bien sabido que además de este producto sales otros como son CO₂, CO, entre otros agentes contaminantes del medio ambiente.

Clara (2017), Desde el punto de vista técnico una de las formas más efectivas para ahorrar y utilizar racionalmente la energía térmica de la quema de combustibles fósiles, es recuperar el calor de desecho de los procesos y de las calderas. Este calor posee un margen suficiente de energía que permite su aprovechamiento en otros procesos, entonces el calor residual se transforma en una fuente de energía. Lo anterior fue evidenciado en el plan piloto de eficiencia energética en sistemas de generación y distribución de vapor desarrollado en 2005 por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE México).

Sepúlveda, Ramírez y Toro. (2017), En Colombia y particularmente en el Área Metropolitana del Valle de Aburra, en su sector industrial no hay estudios asociados al conocimiento integral de calderas, por la cual se buscó identificar los riesgos de seguridad tanto para el personal de operación de dichos equipos, asimismo también que

su mantenimiento sea más seguro y tengan un clima de trabajo. Así también, no cuentan con estudios relacionados con el impacto medio ambiental que produce la emisión de los gases de caldera, y por la que no cuentan con la verificación permisible de la emisión de gases al aire con la normativa vigente.

Suasnabar (2014) en su tesis diseño de una caldera domestica para quemar bosta en Lima. Que su diseño de caldera está enfocado en las zonas alto andinas para brindar una calefacción, su diseño está basado en normas del código ASME de las secciones IV y VII, demostrando así la gran importancia de estar sujetos a un diseño ingenieril que otorga una seguridad de operación y mantenimiento de caldero. Además, redacta la importancia de la selección de materiales tanto para los tubos de humo como para el casco, asimismo nos dice que un 20% del presupuesto se invirtió en accesorio de la caldera.

Quispe y Apaza (2015) en su tesis diseño de una caldera pirotubular de 15 BHP con parámetros de trabajo para altitudes superiores a los 3800 m.s.n.m, Juliaca. Como su estudio está basado en altitudes superiores a 3800 m.s.n.m, encontraron un gran déficit de oxígeno que no ayuda a una buena combustión para hacer la generación de vapor. Por la cual consideran que el cálculo más importante es la eficiencia del caldero, por la cual plantean que el método indirecto es adecuado para determinar esta eficiencia. Además, por medio del cálculo iterativo, se pretendió mantener lo más alto posible la eficiencia de los calderos va desde un 65% hasta un 85% en condiciones normales, ósea a nivel del mar por la cual, en su estudio se basa en mantener este rango, pero en grandes altitudes.

Sanz y Patiño (2014), Menciona que mediante la instalación de aparatos descalcificadores y desmineralización para el tratamiento del agua para evitar el caliche se obtendrá una mayor eficiencia en el rendimiento de la caldera, además reducirá costos de mantenimiento y evitará la corrosión. Asimismo, nos dice que un condensador aumentara la eficiencia y disminución de gases.

Martínez (2010), nos dice que la ley de la física que se basa en que la materia de ingreso de una determina sustancia a un sistema es la misma a la salida de dicho sistema, ya que solo se transforma (cambio de estado).

La conservación de la energía se fundamenta en que la energía específica de una sustancia de ingreso a un sistema, puede variar a la salida del mismo sistema, dependiendo de la masa (Shapiro, 2005).

Existen diversos tipos de calderas, Sanz y Patiño (2014), mencionan que es un recipiente metálico de acero de forma cilíndrica, atravesado por grupo de tubos, por cuyo interior circulan los gases de combustión, que ceden el calor al agua que bañan el exterior de los tubos. Además, pueden ser de tipo vertical o horizontal. Dependiendo de la presión, podríamos clasificarlas también, si están por debajo de los 19 bar, son de baja presión, y si están sobre los 62,76 bar son de media presión. En nuestro medio los sectores de calderas de pequeñas empresas usan de baja presión (Montalvo 2000).

Con respecto a las partes de una caldera, Uceda (2012), nos dice que es un componente de forma cilíndrica y se encarga de contener los fluidos (agua/vapor) y evitar que salgan al exterior, además aquí van montadas las tabuladoras de control y supervisión, tales como los controles de nivel, los indicadores ópticos de nivel y orificios de inspección del lado de agua, etc.

Así mismo, el Hogar de combustión: Es de construcción cilíndrica y forma horizontal, puede fabricarse ya sea lisa u ondulada, asimismo se diseña en base a la presión y función de la caldera. Se encarga de contener la llama del quemador e iniciar el intercambiador de energía por radiación.

Luego tenemos el C. Cenicero, que es el espacio bajo la parrilla para almacenar las cenizas después de quemar el carbón, la cual se debe hacer una limpieza periódica para no obstruir el flujo de aire para una buena combustión. El Rendimiento de la caldera, es fundamenta en el proceso, podemos encontrarla a partir de dos métodos: Método directa o indirecta. Asimismo, sus equipos de acompañamiento son un gasificador es el proceso mediante la cual un combustible rico en carbono es oxidado parcialmente por medio de un agente oxidante, dando un producto gaseoso con poder calorífico utilizable. La transferencia de materia y calor juegan un papel importante sus etapas son, evaporación de la humedad, pirolisis, combustión de volátiles y la reacción de carbonización o mecanización. (Gutiérrez J. 2017)

El ablandador es un equipo suavizador cuya función es reducir al máximo las sales minerales por el agua al ingreso de un caldero. La reducción de dichos minerales puede ser por mecánicos, electrónicos y químicos que ofrece esta máquina. Previniendo así de encalichamiento de las tuberías de alimentación y de los tubos de humo de la caldera. (Taípe V. y Chinlli H. 2015).

II. MÉTODO

2.1. Tipo y diseño de investigación:

El tipo de investigación es aplicada, tiene como propósito la solución de un problema o una necesidad a satisfacer del investigador, por medio de la aplicación de conocimientos validos o generales. Hernández, Fernández y Baptista (2014). Se recolectará conocimientos generales, teorías, principios, normas basados en el diseño de calderas de vapor satura, donde se realizará los cálculos mecánicos, térmicos, estructural entre otros, para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor y el impacto medio ambiental.

El diseño de investigación es no experimental, es aquella que se realiza sin manipular las variables, se basa en observar los fenómenos tal y como están en su contexto natural ara luego analizarlos. Argote y Minguela (2010). Es pre experimental, porque es una exploración para evaluar si se requieren más estudios, porque los resultados no son concluyentes.

2.2. Variables y operacionalización:

Variables independientes:

- Flujo másico de combustibles
- Presión de vapor
- Temperatura de vapor
- Dimensiones de la caldera
- Temperaturas de gases residuales

Variables dependientes:

- Propuesta de mejoras
- Rendimiento del nuevo diseño de caldera
- Costos de producción de vapor

- Reducción de impacto ambiental.

2.3. Población, muestra y muestreo:

Población:

Sistemas de generación de vapor saturado de plantas industriales de La Libertad.

Muestra:

Caldera de la Empresa “Escobedo Sandoval S.A.C”

Muestreo:

Se realizará un muestro no probabilístico y por conveniencia para determinar la muestra en la investigación.

2.4. Técnicas e instrumentación de recolección de datos:

La validez de un instrumento determina la revisión del contenido, el contraste de los indicadores con los ítems que permiten medir variables planteadas. Se estima la validez como el hecho de que un instrumento sea elaborado y aplicado de tal modo que permita evaluar lo que se espera medir.

Tabla 1. Técnica y Recolección de datos.

Objetivo	Técnica	Instrumento
Realizar la toma de datos para evaluar el estado actual de la generación del Sistema de vapor.	Observación	Ficha de observación para recolección de datos. Ver anexo N°15
Realizar la toma de datos por medio de instrumento de calor.	Observación	Ficha de observación para recolección de toma de datos. Ver anexo N°16

Fuente: Elaboración propia

Valides y confiabilidad de los instrumentos.

La validez de contenido es un criterio que nos ayuda a comprobar la calidad de instrumento, por la cual se verifica si este evalúa lo que se pretende medir. El instrumento es de vital importancia, así como su validación es por medio de expertos, los cuales certifican si las cuestiones y criterios del instrumento son coherentes con la investigación (Corral, 2012).

Tabla 2. Validación de instrumento por el experto.

Experto	Instrumento aplicable
Ing. Paredes Rosario, Raul R.	si

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Procedimiento:

El procedimiento de diseño a realizar consiste de la siguiente manera, primero determinará de necesidades de cliente, se realizará la encuesta al dueño de la empresa con la necesidad de identificar sus necesidades y requerimientos para el sistema de generación de vapor de su empresa.

Segundo se definirá del problema en términos ingenieriles, que se expresará en términos ingenieriles las necesidades de la empresa, luego de recolectar los datos con el cuestionario y también por medio de la observación el registro de los datos la empresa.

En tercer lugar, dimensionar generalmente el equipo, donde diseñará los planos respectivos del sistema integrado para la generación de vapor de acuerdo a normas.

En cuarto lugar, determinar el material de la estructura y accesorios de la caldera, se hará la selección del material de acuerdo a normas técnicas peruanas y europeas para recipiente de presión.

En quinto lugar, el esquema de control del sistema de generación de vapor saturado, se plateará el diseño del esquema de la caldera, así como se especifica el funcionamiento de la caldera.

En sexto lugar, un paso muy importante el análisis económico, se realizará el estudio a través de identificadores económicos.

2.6. Método de análisis de datos:

Mediante el cuestionario, se obtendrá los valores promedios o medios en un determinado tiempo, tales como: el flujo de vapor, presión, temperatura, flujo de aire, consumo de carbón, consumo de médula de bagazo, poderes caloríficos, dimensiones del hogar del caldero, temperatura de gases residuales, temperatura de agua de alimentación, tiempo perdidos del caldero, tipos de averías o fallas, tamaño del carbón y costos de combustibles. Con la recolección de los principales datos mencionados se calculó el rendimiento energético actual, flujo de gases (impacto ambiental), ratio de combustión, temperatura de gases, tiempo de operación útil, tiempos perdidos y operatividad.

2.7. Aspectos éticos:

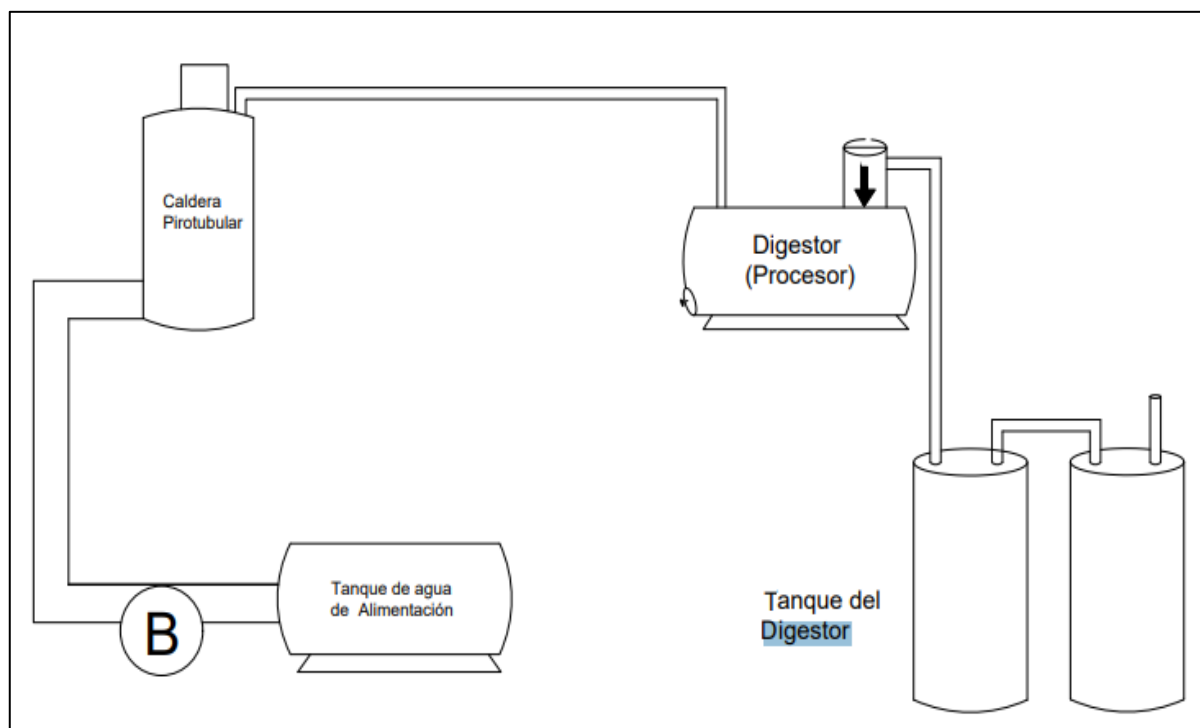
Los investigadores se comprometen a respetar la veracidad de los resultados y confiabilidad del diseño para nuestra investigación que se presenta. Además, se hizo referencias según norma ISO-690 para registrar datos de distintos autores.

III. RESULTADOS

Recolección de datos y necesidad de la empresa Escobedo Sandoval S.A.C. En la visita que se realizó a la empresa fue para una obtención de información tanto de los equipos que operan ahí, así como para ver cómo es su producción, por la cual se recolecto datos de la caldera, la cual es la principal fuente de energía para su producción esta información se encuentra detallado en la figura N°1. En cuanto a la necesidad de la empresa necesita una elaboración de una nueva caldera bajo normas de fabricación según normas técnicas peruanas ya que se ha empezado un proceso de legalización de las empresas de este ámbito, por la cual el estado pide certificación de seguridad de dichos equipos para protección del personal que labora en dicha empresa. El Esquema actual de la empresa es el siguiente:

Figura N°1

Proceso de producción Escobedo Sandoval S.A.



(DISEÑO DE CALDERAS PIROTUBULARES DE 15 BHP CON PARÁMETROS DE TRABAJO PARA ALTITUDES SUPERIORES A 3800 m.S.n.m, 2015)

3.1. Desarrollo del primer objetivo para hallar la eficiencia actual del caldero.

En el desarrollo de los distintos cálculos iterativos para hallar la eficiencia del estado actual del caldero, en el camino con los datos obtenidos y por medio de cálculos se concluyó que la capacidad de la caldera era de 24.29 BHP, asimismo se obtuvo la eficiencia de caldero de 64.6%. la cual se comparó con las características de un caldero de 60 BHP de capacidad que se asumía por la empresa Escobedo Sandoval SAC (ver Tabla N° 3). Los cálculos se encuentran a detalle en el Anexo N°8.

Tabla 3. Caldera actual vs caldera de 60 BHP

Parámetros	unidades	Caldera actual	Caldera de 60 BHP
Flujo másico de vapor	Kg/s	0.1057	0.261
Calor total	Kw	433.87	874.95
eficiencia	%	64.6	80

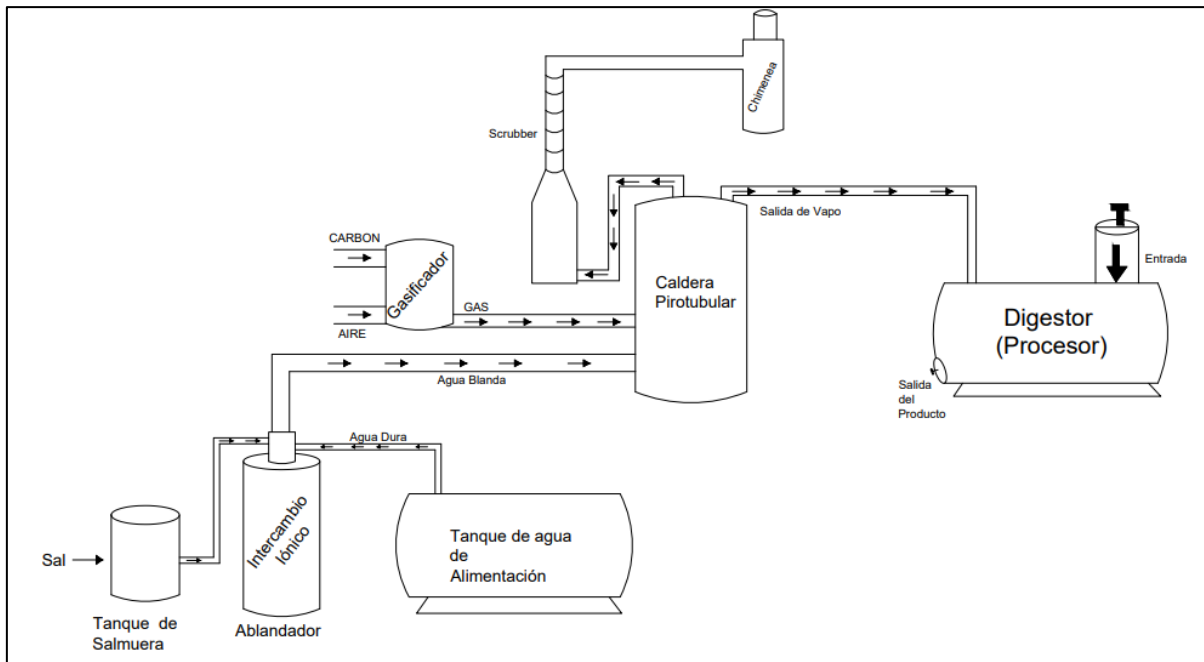
Fuente: Elaboración propia.

Esquema de la nueva propuesta para mejorar la eficiencia y control medio ambiental

Este nuevo proceso se agregarán nuevos equipos para mejorar la eficiencia, control ambiental, vida útil de la caldera y así mismo aumentara la producción , dichos equipos son: un gasificador de carbón que permitirá la limpieza del combustible y a su vez por medio del proceso de pirolisis estará brindando el combustible en forma de gas para un fácil prendido de caldera, conjuntamente se agregara un ablandador de agua para reducir todas esas impurezas que contiene el agua, la cual produce incrustaciones y reducción de eficiencia de la caldera por medio del encalichamiento de los tubos de humo, afectando a su vida útil, y para ayudar a mejorar el control de emisión de gases a la atmosfera se contara con un scrubber que cumple la función de limpiar los gases emitidos al medio ambiente. A continuación, se presenta el nuevo sistema y la continuidad de los demás objetivos planteados. En la figura N°2 se encuentra la caldera peritubular alimentada por el gasificado, a su vez la salida de los humos se encuentra el Scrubber para realizar el lavado de gases.

Figura N°2

Propuesta del nuevo Proceso de producción Escobedo Sandoval S.A



Fuente: Elaboración propia

3.2. Desarrollo del objetivo de diseño de caldera

La caldera diseñada termino con un diámetro de 1.2 m, una altura máxima de 2.4m para la capacidad de 30 BHP. En total se emplearán 180 tubos dispuestos en 5 paso con 36 tubos de 1.5” en cada paso. En la tabla N° 4 se detallan las características que se obtuvo de los cálculos del diseño de la caldera la cual se encuentran detallados en el anexo N° 9.

Tabla 4. Características del diseño de caldera.

características	Valor	Unidades
Capacidad	30	BHP
flujo másico de vapor	0.1305	Kg/s
temperatura del hogar	750	°C
Temperatura de chimenea	208	°C
Temperatura de vapor	158	°C
Presión manométrica	5	Bar
Eficiencia	80	%
Calor útil	347.83	kw
Calor total	434.78	kw
Flujo másico de combustible	0.0097	Kg/s
Flujo másico de aire	0.166	Kg/s
Flujo másico de los gases de combustión	0.1517	Kg/s
Calor de chimenea	41.77	kw
Temperatura del agua	23	°C
Temperatura del aire	23.5	°C

Coeficiente de transferencia de calor	33.0738	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
Coeficiente de ebullición nuclear	61434	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
Calor latente de evaporación	$2061 * 10^3$	$\frac{W}{m^2}$
Temperatura media logarítmica	252.95 $^\circ C$	$^\circ C$
Área de transferencia de calor	41.58	m^2
Numero de pasos	5	
Numero de tubos	180	1 ½"
Diámetro de caldera	1.2	m

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Desarrollo de los objetivos de selección de equipos.

Para reducir la cantidad de partículas que se produce por el agua dura, que producen encalichamiento en las tuberías se empleó el ablandador, que después que pase el agua por acá se tendrá como producto el agua blanda. En la tabla 5 se muestra las características más resaltantes del ablandador seleccionado

Tabla 5. Selección de equipos de ablandador.

Equipo	Capacidad	regeneración
Ablandador	2.71 ft^3	10.68 días
Ablandador seleccionado	3 ft^3	11 días

Fuente: Elaboración propia

Selección de equipos de gasificador.

La capacidad del gasificador de potencia es de 511.92 kw por la cual, se buscó en catálogos de gasificadores que se encuentren en este rango de 550 a 650 kW, siguientemente se encontró de 646.33 kw, por ende, se optó por este equipo que se muestra en la tabla N°5. Determinados cálculos de selección que se encuentran detallados en el anexo N° 10 y Su Ficha técnica anexo N° 11

Tabla 6. Selección de equipos de gasificador.

Equipo	Capacidad	Consumo de combustible
gasificador	511.92 kw	0.0158 kg/s

Gasificador seleccionado	646.33 kw	0.0972 kg/s
---------------------------------	------------------	--------------------

Fuente: Elaboración propia.

Selección de equipos de scrubber.

Se eligió un Scrubber de alto rendimiento para un mejor control de emisión de gases, en base a la potencia de la caldera, en la tabla N° 7 principales características. Ficha técnica se detalla en el anexo N° 13

Tabla 7. Selección de equipos de scrubber.

Equipo	Capacidad	Potencia
Scrubber	2000-3055 m3/h aire	18.5 kw

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Desarrollo de objetivo económico del sistema generador de vapor saturado.

Para análisis de costos se consideran los siguientes, mano de obra directa, que es el esfuerzo físico y mental que de las personas que construyen el caldero. Los materiales directos, son netamente para la fabricación de la caldera, como los tubos, plancha, etc. Asimismo, los costos de manera indirecta son difíciles de identificar la materia prima de manera indirecta, la mano de obra del ingeniero mecánico, maestro soldador, etc. Estos costos se detallan en la tabla N°8

Tabla 8. Presupuesto del diseño de caldera.

Materiales	Cantidad	unidad	Precio unitario	Costos S/
Plancha ASMT- 285 grado “C” 1/4 – 2.4mX7.34mX6.35mm	1		850	850
Tubos ASMT 192 de 1 1/2”	58		120	6960
Lana mineral	1	m2	400	400

Lamina de asbesto	1	mm	700	700
			Total	8910
accesorios	canti	unidad	Precio	Costos S/
	dad		unitario	
Quemador	1		4000	4000
Electrobomba	1		1050	1050
Tablero de control	1		3000	3000
Válvula de seguridad	1		400	400
Válvula de purga	6		60	360
Control de nivel	1		560	560
Mirilla de observación.	1		1000	1000
manómetro	1		500	500
			Total	12870
Mano de obra	Canti	unidad	Precio	Costos S/
	dad		unitario	
Mecánico soldador	60	hora	60	3600
Ayudante soldador	60	hora	50	3000
Electricista	40	hora	60	2400
Ayudante electricista	30	hora	50	1500
			Total	10500
Preparación de material	Canti	unidad	Precio	Costos S/
	dad		unitario	
Rolado de planchas			500	500
Corte y preparado de espejos			120	120
Corte y preparado de tubos	58	m	10	580
			Total	1200

Fuente: Elaboración propia

En la construcción solamente de la caldera se gastará S/31564.

3.5. Plan de Mantenimiento del sistema generador de vapor saturado de la empresa Escobedo Sandoval SAC.

Se presenta la tabla de mantenimiento N° 9, con el fin de brindar un listado de tareas que se deben realizar, con sus posibles fallas asimismo también se brinda periodos de vida útil de ciertos componentes que se encuentran ya detallados en dicha tabla, además este plan de mantenimiento va de la mano para alargar la vida útil del caldero.

Tabla 9. Plan de mantenimiento

Sistema	Descripción	Componentes	Posibles fallas
Sistema de transferencia de calor	Es la red de cámara y tubos que están en contacto con el agua al interior donde circulan los gases calientes	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tubos del hogar ✓ Cámara posterior de los gases ✓ Cámara frontal de gases 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Corrosión ✓ Deformación ✓ Incrustaciones ✓ Taponamiento por acumulación de hollín
Sistema de monitoreo y control	Cumple la función de mantener la presión y el líquido dentro de los rangos aceptables de operación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Control de nivel ✓ Control de presión ✓ Manómetro ✓ Manilla de nivel ✓ Válvula de Alivio de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lecturas incorrectas del nivel de control ✓ Lectura incorrecta de presión ✓ Lecturas incorrectas de manómetro ✓ Lectura incorrecta de mirilla de nivel de agua
Sistema de agua de alimentación	Es la que se encarga de la reposición de agua a caldera	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bomba de agua ✓ Accesorios de tubería ✓ Tubería de alimentación 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Válvula pegada ✓ Fugas ✓ Cavitación de la bomba ✓ Bomba no arranca ✓ incrustaciones
Sistema de combustión controlada	Es el equipo que se encarga de encender, mantener y apagar la reacción de combustión de manera segura	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Transformador de ignición ✓ Electrodo de chispa ✓ Ventilador ✓ Bomba de combustible 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fuga de combustible ✓ Problemas con los electrodos de chispa ✓ Combustión incompleta ✓ No hay ignición.

		✓ Electro válvula de combustible	
Sistema de alojamiento de agua y vapor	Zona donde se almacena el agua que se va a evaporar	✓ Espejo posterior ✓ Válvula de suministro ✓ Agujeros de inspección ✓ Espejo delantero	✓ Corrosión ✓ Fracturas ✓ Deformación ✓ encalichamiento
chimenea	Es la zona por donde los gases son evacuados a la atmosfera.	✓ Brida de acople ✓ Tubo de chimenea	✓ Obstrucción ✓ Obstrucción de gases
Cámara de agua y vapor	Es el área donde se almacena el agua que se va a evaporar y el vapor producido, en la caldera pirotubular este área es la misma.	✓ Coraza ✓ Aislamiento térmico ✓ Chapa de refuerzo	✓ Corrosión ✓ Fracturas ✓ Deformación del tanque
Sistema de acoplé entre módulos	Es la unión entre módulos, asegurando así una comunicación adecuada de fluidos entre ellos.	✓ Mamparas ✓ Juntas mecánicas ✓ Brida de unión ✓ Pernos de unión	✓ Fugas de vapor o agua hacia el exterior ✓ Infiltración de vapor hacia el Sistema de transferencia de calor.

Plan de mantenimiento con respecto a tiempos.

Componente	falla	inspección	frecuencia
Tubos del hogar	✓ Deformaciones ✓ Fracturas ✓ Obstrucción de flujo de humos. ✓ Perdida de eficiencia de transferencia de calor	✓ Inspección visual de capa de hollín	3 meses
		✓ Vaciado e inspección de la capa de incrustaciones	6 meses
		✓ Inspección visual del nivel de corrosión	6 meses
	✓ Deformaciones ✓ Fracturas	✓ Inspección visual de capa de hollín	3 meses

Cámara delantera y posteriores de los gases	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Obstrucción de flujo de humos. ✓ Perdida de eficiencia de transferencia de calor 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaciado e inspección de la capa de incrustaciones 	6 meses
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspección visual del nivel de corrosión 	6 meses
Control de nivel de agua	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fugas de vapor ✓ Falla en el nivel de agua 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lavado mecánico ✓ Revisión 	6 meses
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ visual de los componentes 	6 meses
Control de nivel de presión	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fuga de presión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspección visual del diafragma 	1 año
manómetro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lectura incorrecta 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ calibración 	1 año
mirilla	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lectura incorrecta 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lavado mecánico 	6 meses
Válvula de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No se dispara en la presión de ajuste 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apertura manual para evitar que la válvula se pegue 	1 mes
Tubería de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudal insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ incrustaciones 	5 meses
Válvula anti retorno	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Retorno de agua al tanque ✓ Caudal insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Posible falla de bomba 	Hasta que falle
Bomba de agua	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vibraciones ✓ Caudal insuficiente ✓ No arranca 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rodamientos 	7 meses
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sello mecánico 	Hasta que falle
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fuente de alimentación 	Hasta que falle
Transformador de indignación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No hay indignación 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cambio de transformador 	Hasta que falle
Electrodos de chispa	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustión deficiente ✓ No hay combustión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspección visual del estado de porcelana 	6 meses
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisar la distancia entre electrodos 	6 meses

ventilador	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustión deficiente ✓ No hay combustión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limpieza mecánica del impulsor 	6 Meses
Bomba de combustible	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustión deficiente ✓ No hay combustión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lavado mecánico 	6 meses
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisión de filtro de combustible 	2 meses
Coraza	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deformaciones ✓ Explosiones ✓ Arrastre de espumas ✓ corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ lavado químico ✓ lavado mecánico 	1 año
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ tintas penetrantes 	2 años
espejos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deformación ✓ explosiones 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ lavado químico ✓ lavado mecánico 	1 año
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ tintas penetrantes 	2 años
Aislamiento térmico	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Consume excesivo de combustible ✓ Recalentamiento de la chapa protectora 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limpieza e inspección 	6 meses
Tubo de chimenea	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustión deficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acumulación de hollín 	6 meses
Juntas mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fugas de vapor al exterior ✓ Fugas de vapor hacia el hogar 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Recambio 	1 año
Alarma de nivel peligro	Luz roja encendida	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Problemas de funcionamiento de caldera 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fallo de bomba ✓ Líneas de agua obstruidas ✓ Fugas de vapor

Fuente: Elaboración propia.

IV. Discusión

Cansaya N. y Huallata P. en su tesis titulada “Diseño de una caldera Pirotubulares de 15 BHP con parámetros de trabajo para altitudes superiores a 3800 m.s.n.m”, concluye que es necesario que se cuente con un tratamiento de agua más eficiente, por las distintas sustancias químicas que contiene el agua.

Para este caso la caldera está diseñada para trabajar en la zona liberteña donde la altura máxima es de 34 m.s.n.m, debido a ello los requerimientos para sistema de tratamiento de agua no están crítico lo cual es menos costoso en comparación con equipos más eficiente necesarias para otros ambientes más rigurosos. El ablandador seleccionado de 3 pie³ es un poco al valor calculado, lo cual es beneficio pues cubre una posible pérdida en el rendimiento durante el uso continuo. Además el tratamiento de agua del ablandador se usará para eliminar las impurezas químicas del agua, para evitar incrustaciones en el interior de la caldera, también puede ocasionar picaduras en los tubos de humo, trayendo consigo una reducción de la eficiencia térmica.

Suasnabar M. en su tesis titulada “diseño de una caldera domestica para quemar bosta” reafirma la gran importancia del diseño de calderas bajo parámetros ASME, y a la vez los estudios de teorías y cálculos iterativos por medio de la ingeniería.

En el estudio realizado también se reafirma la gran importancia de los estudios de diseño bajo normas y parámetros de construcción de calderas, acompañado de los estudios ingenieriles, ya que en el desarrollo de la tesis por medio de la recolección de datos se reafirmó la construcción de la caldera de manera empírica y con solo 6 años de fabricación ya contaba con una picadura en los tubos de humo, por la cual ya reduce la eficiencia de la caldera como de la producción trayendo consigo un impacto financiero, a la vez un riesgo para el operario.

Iguaran O. y Martínez D. en su tesis titulada “diseño y construcción de una minicaldera pirotubular para el laboratorio de transferencia de calor” concluye que el diseño bajo normas ingenieriles es aceptable ya que se cuenta con una eficiencia de 85%.

En contraste con el diseño propuesto en la eficiencia actual del sistema de generación de vapor saturado para la empresa Escobedo Sandoval, se encontró una eficiencia de 66.3% la cual no es aceptable para los rangos que se plantea las distintas empresas fabricantes de calderas, con acorde a las normas la eficiencia debe de estar para estas calderas superiores al 80%, por la cual con el nuevo sistema se llega a fijar una eficiencia del 80% la cual es muy aceptable ya que se encuentra dentro del rango de aceptación, asimismo esto puede mejorar si al sistema se le agrega equipos para aumentar la temperatura del agua de alimentación y la temperatura del aire. Además, se establece la lana mineral como aislante térmico tanto para la caldera como para las tuberías de vapor.

Osejo D. en su tesis titulada “diseño de una caldera de generación de vapor pirotubular de 10BHP expandible a 25 BHP mediante módulos” reafirma la importancia de la ingeniería para la construcción de calderas bajo normas y parámetros ASME, asimismo no habla del aumento de la capacidad por medio de módulos de dichas calderas, conjuntamente da a conocer que las desviaciones de la eficiencia por medio de estos módulos no supera el 4%.

En el estudio planteado se basa en una caldera de 30 BHP para la producción de vapor de la empresa por la cual como se hizo el análisis de la capacidad de la caldera actual era de 24 BHP, por eso se elaboró de una capacidad mayor para cubrir en caso que haya más demanda de vapor para una determinada producción, asimismo si se necesitara más vapor que sea mayor a la producción de 30BHP, se implemente una caldera de las mismas condiciones y características de forma paralela.

Morales R. en su tesis titulada “diseño de una caldera pirotubular vertical” se plantea que desde la base de diseño de una caldera sea bajo normas y parámetros ingeniería, pero a su vez plantea una visión comercial, donde plantea la construcción de dicho equipo al más bajo costo, pero de buena calidad ya que en el mercado los precios de dichas calderas son muy altos.

En esta tesis se plantea que el diseño de la caldera vaya de acorde con la normatividad de construcción de dichos equipos bajo normas extranjeras como

nacionales, a su vez se plantea que dicho diseño sea aceptado por el ministerio de energía y minas que ha empezado a formalizar dichas empresas y un punto clave es la seguridad del personal de trabajo por la cual el equipo debe de contar con todas las normas exigidas por dicho ente, asimismo realizan la inspección de emisión de gases al medio ambiente para ver el impacto de contaminación, por la cual también ya se cuenta con un plan de agregar equipos para tener un mayor control de emisión de gases contaminantes al medio ambiente, es por la cual también se plantea el punto de vista económico donde se planea que la caldera sea eficiente para el propósito creado, con el menor presupuesto sin descuidar la seguridad que debe brindar el equipo.

Pinedo E. y Ruiz E. en su tesis titulada “análisis de diseño, construcción y evaluación de un caldero Pirotubulares con fines académicos en la escuela de la academia profesional de ingeniería en energía” en su estudio da a conocer una eficiencia térmica de 85%, en cambio se plantea en tener control del flujo de combustible y agua de alimentación, donde el cálculo para determinar la eficiencia térmica fue de manera directa, dando un resultado de 72%.

Hay muchos factores que afectan a la eficiencia térmica de la caldera, un punto es el aislamiento térmico puede ser fibra de vidrio que ayuda a mejorar y mantener esta eficiencia térmica, como se mencionó en este estudio la eficiencia es de 80%, pudiendo ser mejorada por medio de un precalentador de aire, ya que el aire que se está usando ahora es a temperatura ambiente de 23°C, También se pudo ver si se aumenta la temperatura del agua ayuda a disminuir el consumo de combustible pero impacta de manera positiva al funcionamiento de la caldera ya que mejora su eficiencia térmica, trayendo consigo un ahorro de dinero por la reducción del consumo del combustible.

Ortega H. en su tesis titulada “estudio de pre factibilidad para el montaje y puesta en marcha en un sistema de generación de vapor a base de carbón en la planta de alimentación balanceados para aves de avidesa Macpollo SA” en su estudio reafirma el gran costo de generación de vapor y también hace el hincapié del impacto medio ambiental, donde se tienen que someter a las normas de emisión de gases atmosféricos y el manejo de sus residuos sólidos

En estudio realizado hace énfasis en tener un buen control de la eficiencia térmica y mejor control de emisión de gases desde el punto de vista económico es una desventaja ya que este sistema de generación de vapor para dar inicio a la marcha como nuevo sistema necesita más inversión de dinero, pero a la larga dará un gran resultado en lo económico y lo más importante es que tendrá un buen control de emisión de gases y no tendrán problemas con las autoridades para poder seguir operando y evitar multas por contaminación atmosférica,

V. Conclusiones

- Para conocer la eficiencia de la caldera del sistema de generación de vapor actual en la empresa Sandoval, fue necesario utilizar el método de indirecto descrito en la norma NTP 350.301.2001, pues no se tenía a la mano los datos necesarios para emplear otro método. se logró determinar los parámetros actuales de la eficiencia del sistema de generación de vapor saturado que era de 66.3%, la cual era una eficiencia muy baja para este tipo de calderas por la que su eficiencia debería estar en el rango de $80 \pm 2\%$, asimismo se logró determinar la capacidad del caldero que era de 24.35 BHP, con un flujo másico de vapor de 0.1057 kg/s
- Para el diseño de la caldera se definió una capacidad de 30 BHP, porque la capacidad que necesita empresa es de 24.35 BHP, entonces no había razón para sobre dimensionar la caldera en 60 BHP, si fuera la necesidad de usar más vapor en la producción se implementaría otra caldera de la misma capacidad en paralelo. La caldera de 30 BHP, tiene un flujo másico de 469.8 kg/hr superior a la capacidad actual en la empresa, partiendo tener a disposición mayor vapor para otros procesos en caso se requiera. Para esta potencia se obtuvo una caldera de 1.2m m de diámetro, tamaño que esta dentro del rango establecido en la norma ASTM, un largo de 2.4 metros con 180 tubos y dividido en 5 pazos, el agua de alimentación su temperatura $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura en el hogar de $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de chimenea de $208\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de vapor $158\text{ }^{\circ}\text{C}$, su presión de 5 bar manométrica, con una eficiencia de 80%.
- El diseño tiene como producto los planos de fabricación donde se detallan las medidas de las tuberías, su disposición dentro de la caldera, así como las dimensiones del hogar.
- Para seleccionar el ablandador basto con conocer la capacidad de caldera, facilitándose procesos de selección. De igual manera el gasificador y el scrubber se seleccionó en base a la capacidad de la caldera. El gasificar mejora reduce el tiempo de encendido de la caldera acelerando el proceso de puesta en marcha. Por su parte

el scrubber puede reducir eficientemente los gases contaminantes que se son expulsados hacia la atmosfera (CO₂, CO).

- El costo total en la fabricación de la caldera es de S/. S/31564. el cual abarca el material, accesorios, mano de obra y preparación del material.

VI. Recomendaciones

- La selección y uso de la caldera deberá ir de acorde a su función y trabajo a realizar, así de esta manera se pueda aprovechar su máxima eficiencia.
- Para aumentar la eficiencia se recomienda instalar un precalentador de aire, así mismo también sería ideal aumentar la temperatura del agua de alimentación ya que trabaja con la temperatura ambiente.
- Es de suma importancia no descuidar el mantenimiento de la caldera, como ya se menciona tiene el mantenimiento diario, mensual y semestral.
- se recomienda, mantener un constante pintado del sistema de generación de vapor para evitar las corrosiones del medio ambiente.
- La caldera deberá contar una alarma de emergencia, en caso de algún problema de funcionamiento de la caldera ya que puede pasar por ejemplo la explosión de caldera, afectando así en la seguridad del operario y la parte financiera de la empresa.

VII. Referencias

- (5 de JULIO de 2020). Obtenido de YOHERSA: <https://www.yohersa.com/>
- Aguilar, B. (15 de Agosto de 2010). Factibilidad técnico económica del cambio de turbina de vapor por motor eléctrico con variador de velocidad para el accionamiento de molinos de cañas en la empresa Casa Grande S.A.A. Lima, Lima, Perú : Universidad Nacional De Ingeniería .
- alderetes, c. o. (201). *calderas a bagazo*. argentina.
- Amo, M. Z. (2014). *Manual practico de operacion de calderas industriales*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Armijo, J. (2006). *Balance de materia y energia* . Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Beltrán, R. (2008). *Conversión Térmica de Energía*. Bogotá: Uniandes.
- Beltrán, R. (2008). *Conversión Térmica de Energía* . Bogotá: Uniandes.
- Bohórquez, R. (2013). *Auditoría energética al circuito de vapor y condensado de una planta de elaboración de café liofilizado*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Broatch, A. (2010). *Ejercicios Resueltos de Máquinas Térmicas* . Barcelona: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Bustamante. (11 de Julio de 2015). *Documentos* . (Adwords) Recuperado el 28 de Abril de 2016, de Molino de bolas : <http://documents.mx/documents/disenio-de-un-molino-de-bolas.html>
- CAJAMARCA, F. (2001). DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA CALDERA pirotubular horizontal de 3 pasos 50BHP. *Tesis de pregrado*. ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL EJERCITO SEDE, Latacunga.
- Cantabria, E. (1 de Enero de 2016). *Rendimiento energetico de una caldera* . Recuperado el 25 de Abril de 2016, de http://www.scalofrios.es/eficiencia/EE_calor/EEI%20-Tema%203.%20Rendimiento%20de%20una%20caldera.pdf
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México , D.F: McGraw-Hill.
- Centrum. (18 de Noviembre de 2009). *Reporte Financiero Burkenroad Perú – El Pacifico* . (PUCP) Recuperado el 15 de Abril de 2016, de Reporte Sectorial de Pesca -Empresa Ribaudo S.A.: <http://centrum.pucp.edu.pe/adjunto/upload/publicacion/archivo/informepesca.pdf>
- Charles, A. (2006). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. México : Interamericana Editores, S.A.
- Cruz, T. (20 de Agosto de 2013). Factibilidad técnico económica del cambio de las turbinas a vapor por motores eléctricos en la molienda de caña para mejorar la cogeneración de energía en la empresa Laredo S.A.A. Trujillo, Trujillo, Perú: Universidad Cesar Vallejo.

- Cueva, B. (18 de Diciembre de 2009). Análisis Técnico-Económico del cambio de turbinas de vapor por motores eléctricos en tándem de molinos del Ingenio La Troncal. Guayaquil, Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Díaz, M., & Ordinola, J. (10 de Diciembre de 2016). Influencia en la instalación del turbo generador de 21,7 MW en la repotenciación de la central de cogeneración de agroindustrias San Jacinto S.A.A. Nuevo Chimbote , Huaraz, Perú: Universidad Nacional Del Santa.
- (2015). DISEÑO DE CALDERAS PIROTUBULARES DE 15 BHP CON PARÁMETROS DE TRABAJO PARA ALTITUDES SUPERIORES A 3800 m.S.n.m. *tesis de pregrado*. Universidad andina " Néstor Cáceres Velásquez", Juliaca.
- Donald, R. (2001). *Termodinámica*. Madrid: Concepción Fernández .
- Doran, P. (20 de Febrero de 1998). *Principios de ingeniería de los bioprocesos*. (Acribia,S.A.) Recuperado el 21 de Abril de 2016, de Balance de energia: <http://procesosbio.wikispaces.com/Balance+de+Energ%C3%ADa>
- ENGINEERING, T. (s.f.). Análisis de la eficiencia en calderas. *artículo técnico*, 12.
- ENGINEERS, T. A. (2011). *Tuberías de proceso*. New York: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.
- F.Gutiérrez. (2011). Modeling of fire-tube boilers. *Thermal Engineering*, 38.
- FERNANDEZ, C. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Fernandez, J. (20 de Junio de 2010). *Maquinas Térmicas*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de Poder Calorífico : <http://www.edutecne.utn.edu.ar/>
- Fernández, P. (1996). *Termodinámica técnica*. Madrid: Universidad de Cantabria.
- Fernández, P. D. (1996). *Centrales Térmicas* . España : Publicaciones cantabria .
- Gerdipac. (10 de Diciembre de 2010). *Materiales Aislantes Industriales*. Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de Aislamiento Térmico : <http://www.gerdipac.com.pe/>
- Guevara, C. (2 de Julio de 2015). *Diagnosticos energeticos en sistemas tármicos* . Recuperado el 3 de Mayo de 2016, de Vapor Flash: <http://biblioteca.uns.edu.pe/>
- Harper, E. (2004). *Generadores, Transformadores y Motores Eléctricos*. México : Limusa Noriega Editores.
- Hernando. (1 de Agosto de 2011). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia* . (Programa de Ingeniería de Alimentos) Recuperado el 20 de Abril de 2016, de Maquinaria y equipos de alimento: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccin_17_molinos_de_boilas.html
- Huertas, G. (15 de Diciembre de 2014). Análisis técnico económico y financiero de la instalación de un sobrecalentador de vapor y una turbina a contrapresión de alta eficiencia en reemplazo de los turbogeneradores N°3 Y N°4 para aumentar la cogeneración de energía eléctrica en la empresa Agroí. Trujillo, Trujillo, Perú .
- J. Massa, J. G. (2015). *Recipientes a presión*.

- JULIO BETANCOURT, J. O. (2010). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALDERA. *Tesis pregrado*. Universidad Eafit, Medellín.
- Kenneth, W. (2001). *Termodinámica*. Madrid : Concepción Fernández.
- Kenneth, W. P., & Donald, R. E. (2001). *Termodinámica* . Madrid : Concepción .
- Kenneth, W., & Donald, E. (2001). *Termodinámica* . Madrid : Concepción Fernández Madrid .
- Kohan, A. L. (2000). *Manuel de calderas*. Madrid: Mc Graw Hill.
- López, G. (2009). *Cálculo financiero aplicado: un enfoque profesional*. Buenos Aires: La Ley.
- Lostanau, L. (2006). *Máquinas Eléctricas* . Lima: San Marcos.
- Mankiw, G. (2012). *Principios de Economía* . Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Matines, J. (2010). *Normas de Construcción de Recipientes a Presión* . Madrid: Bellisco S.A.
- Meléndez, E. (2005). *Cálculo, diseño e instalación de un economizador para una caldera acuotubular de 2900 BHP*. Nuevo Chimbote: Universidad Nacional del Santa.
- Morales, R. (1988). Diseño de una caldera pirotubular. *Tesis de pregrado*. Universidad Autónoma de Occidente, Cali.
- Omar IGUARÁN, D. M. (2008). Diseño y construcción de una mini caldera pirotubular para el laboratorio de transferencia de calor. *Tesis de pregrado*. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CALDERA, Bucaramanga.
- OSEJO, D. (2017). DISEÑO DE UNA CALDERA DE GENERACIÓN DE VAPOR PIRO TUBULAR DE 15 BHP EXPLANDIBLE A 25 BHP mediante módulos. *Tesis de pregrado*. Universidad de América, Bogotá D.C.
- P., K. W., & E, D. R. (2001). *Termodinámica* . Madrid : Concepción .
- Paredes, M. (9 de Julio de 2010). Estudio de factibilidad técnica económica para el cambio de un sistema de cogeneración industrial eléctrico-térmico a un sistema de cogeneración comercial en la empresa Cartavio S.A.A. Trujillo, Trujillo, Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- Perú metales* . (MARTES de JUNIO de 2020). Obtenido de Perú metales : http://www.perumetalescorporacion.com/tubo_A178.php
- peruana, N. t. (2009). *Calderas industriales: Estándares de eficiencia térmica*. Lima.
- Petroperú. (20 de Febrero de 2014). *Combustibles* . Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de Poderes caloríficos : <http://tera-3.ul.cs.cmu.edu/>
- Purizaca Felipa, R. (2015). *Diseño técnico y económico de un sistema de recuperación de vapor flash de purgas continuas para calentar el agua de alimentación de las calderas de la empresa pesquera Ribaudo S.A.* Trujillo: Universidad Cesar Vallejo .
- QUISPE, J. (2014). Evaluación estructural de las uniones soldadas en la construcción de calderas, como medida de asegurar su resistencia mecánica. *Tesis de pregrado*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO, Trujillo.

- Renovetec. (15 de Febrero de 2014). *Caldera para Biomasa* . Recuperado el 5 de Mayo de 2016, de Caldera de lecho Fluidizado : <http://www.renovetecingenieria.com/biomasa/calderasbiomasa.html>
- Rodas. (10 de Enero de 2011). *Monografías* . (Publicaciones y Recursos Educativos) Recuperado el 15 de Abril de 2016, de Tecnología del molino de bolas: <http://www.monografias.com/trabajos37/molino-de-bolas/molino-de-bolas.shtml>
- RUBIO, M. (2018). Modelo de tranferencia de calor por eebullicion en un caldera de 10 BHP. *INFORMADOR TÉCNICO*, 53.
- Sarco, S. (2012). *Calderas y accesorios*. 50.
- Shapiro, M. (2005). *Fundamentos de Termodinámica Técnica* . Barcelona: Reverté S.A.
- SHARMA, A. (2017). DESIGN OF THE HORIZONTAL FIRE TUBE BOILER. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 50.
- Shigley. (2006). *Mechanical Engineering Design*. United States of America: McGraw–Hill Primis.
- Skf. (1 de Enero de 2016). *SKF Bearing Calculator*. Recuperado el 7 de Mayo de 2016, de Herramienta SKF para el cálculo de rodamientos: <http://www.skf.com/es/knowledge-centre/engineering-tools/skfbearingcalculator.html>
- Sosa, J. (2013). *Recuperación de condensados generados en el sistema de drenaje de cabezales de vapor y venas de calentamiento en el área de setil (servicios auxiliares) de la Refinería Estatal de Esmeraldas - See more at: http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/3677#st*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Sowell, T. (2013). *Economía Basica* . España : Deusto SA.
- SUASNABAR, M. (2014). DISEÑO DE CALDERA DOMESTICA PARA QUEMAR BOSTA. *Tesis de pregrado*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Lima.
- Tello, C. (1 de Enero de 2016). *Concepto de balance materia y energia* . (Reverter) Recuperado el 20 de Abril de 2016, de Academia: http://www.academia.edu/9208984/CONCEPTO_DE_BALANCE_DE_MATERIA_Y_ENERG%C3%8DA
- Thomas, S. (s.f.).
- TLV. (1 de Enero de 2016). *Compañía especialista en vapor*. Recuperado el 7 de Mayo de 2016, de Vapor flash : <http://www.tlv.com/>
- VÍLCHEZ, J. L. (2016). *Tesis de pregrado*. UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS, Lima.
- Zubicaray, M. (2010). *Energía Eléctricas y Renovables*. Madrd: Limusa-Wiley.

VIII. ANEXOS

ANEXOS N°1

Tabla 10. Operacionalización de variables

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Categorías o dimensiones	Definición operacional	Indicador	Nivel de medición
Eficiencia del sistema.	Variable dependiente	Una manera muy simple de definir la eficiencia es la razón entre el calor absorbido y el calor liberado. Oelker A.	Eficiencia térmica .	Se obtendrá mediante la toma de datos de la caldera, por medio del calor útil y perdido.	Calor útil obtenido por cada kilogramo de combustible	De razón

Impacto medio ambiental	Variable dependiente	Se reconoce a cualquier cambio producido en el medio ambiente ya sea de forma positiva o negativa, sin importar si son significativos o insignificantes. ISO 14001 20015(2016)	Contaminación química	Se basa en la cantidad de carbón consumido al día	Control por medio de gasificador y scrubber	De razón
-------------------------	----------------------	--	-----------------------	---	---	----------

Anexo N° 2

DISEÑO CONCEPTUAL:

Se generaron tres conceptos de diseño capaces de responder a los requerimientos de la especificación de ingeniería, detallados en el anexo 2. Estos conceptos fueron filtrados mediante los criterios de evaluación de la Tabla 10, se les brindo puntuación mediante los niveles de puntuación de la Tabla 11 y fueron comparados en la matriz de selección de la Tabla 12. Se obtuvo como ganador al Concepto 2. Así, este concepto fue la base para los subsiguientes pasos de diseño.

Tabla 11. Criterios de evaluación para estos tres conceptos de diseños.

CRITERIO	PESO
Ergonomía	10%
Confiabilidad	20%
Seguridad	20%
mantenimiento	15%
costo	15%
Durabilidad	20%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Puntajes de evaluación para estas tres alternativas de diseños.

PUNTUACIÓN	EXPLICACION
1	Muy malo
2	Malo
3	Regular
4	Bueno
5	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Conceptos alternativos de selección de diseño ganador.

CRITERIO	PESO	CONCEPTO 1		CONCEPTO 2		CONCEPTO 3	
		CAL	VAL	CAL	VAL	CAL	VAL
Ergonomía	10%	2	0.2	3	0.3	2	0.2
Confiabilidad	20%	3	0.6	4	0.8	3	0.6
Seguridad	20%	2	0.4	3	0.6	3	0.6
mantenimiento	15%	3	0.45	3	0.45	3	0.45
costo	15%	4	0.6	3	0.45	4	0.6
Durabilidad	20%	2	0.4	5	1	4	0.8
Total	100%		2.65		3.6		3.25
Ranking			3°		1°		2°

Fuente: Elaboración propia

Anexo N° 3

Determinación de la elección concepto óptimo

Se seleccionó la alternativa más conveniente mediante una matriz de selección ponderada como se muestra a continuación: Se tomaron en cuenta los criterios (Tabla N°13) para evaluar el sistema de producción de dicha empresa.

- Ergonomía: Se consideró este criterio debido a que el usuario tendrá acceso visible para la manipulación de la máquina. Asimismo, contara con los accesorios para un mejor control de funcionamiento para producir vapor saturado.
- Seguridad: es una de las principales normas que debe de prevalecer en diseñar la caldera no sobrepasar las presiones determinadas de diseño y normas de construcción de dicha caldera.
- Confiabilidad: Se consideró este criterio debido al rendimiento del sistema integrado al momento de funcionar para evitar los momentos críticos en las máquinas.
- Mantenimiento: Este criterio se consideró debido a que es de fácil acceso para la limpieza de caldera.
- Costo: Es un criterio importante ya que dependerá de diseño y normas que se rijan para selección de materiales para la construcción.
- Durabilidad: Es en lo que se debe basar este diseño ya que la vida útil de una

caldera debe ser superior a los 15 años.

- desmontada fácilmente para así poder evaluar y realizar un mantenimiento adecuado.

El ranking obtenido de la matriz de selección ponderada indica que el concepto 2 es el óptimo para el sistema integrado.

Anexo N° 4

Diseño de configuración:

Luego de haber realizado el diseño conceptual y haber obtenido el diseño optimo, se realiza la configuración en el programa CAD para poder analizar los detalles en base a los requerimientos que se tuvo en cuenta por criterio ingenieril. La Tabla 14 muestra los criterios que se definió para la evaluación de las tres configuraciones realizadas, asimismo, la Tabla 14 se evalúa mediante un rango de puntuación las configuraciones de diseño Se desarrolló configuraciones los cuales están detallados en el Anexo 4. Estos conceptos al igual que en el diseño conceptual se realizó una selección ponderada que se encuentra en la Tabla 16.

Tabla 14. Criterios de evaluación para las tres configuraciones.

CRITERIO	PESO
Ergonomía	20%
Confiabilidad	25%
Seguridad	25%
Durabilidad	30%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Puntajes de evaluación para las tres configuraciones.

PUNTUACIÓN	EXPLICACION
1	Muy malo
2	Malo
3	Regular
4	Bueno
5	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. CONCEPTO ALTERNATIVOS

Se seleccionó la alternativa más conveniente mediante una matriz de selección ponderada de la siguiente tabla.

CRITERIO	PESO	CONFIGURACION 1		CONFIGURACION 2		CONFIGURACION 3	
		CAL	VAL	CAL	VAL	CAL	VAL
Ergonomía	20%	2	0.4	3	0.6	2	0.4
Confiabilidad	25%	3	0.75	4	0.8	3	0.75
Seguridad	25%	2	0.75	3	0.75	3	0.75
Durabilidad	30%	2	0.6	4	1.2	3	0.9
Total	100%		2.5		3.35		2.8
Ranking			3°		1°		2°

Fuente: Elaboración propia

Anexo N°5:

Concepto 1: Se presenta una caldera de tipo vertical a carbón de alimentación manual, que consistirá que una persona cargue el carbón dentro de la caldera y lo deposite en la parrilla cada cierto tiempo, para generar el calor necesario en el hogar luego este calor será transmitido hacia los tubos, para la generación de vapor.

Figura N°3

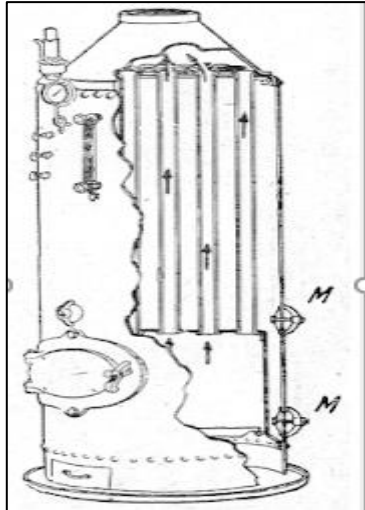


Figura 1. Caldera tipo vertical de carbón

Fuente: elmaquinista. Blog

Concepto 2: se presenta una caldera pirotubular vertical, con un quemador para un fácil encendido de la caldera, siendo así el carbón pulverizado por un gasificador para generar dicha llama y transmitir el calor a los tubos para luego hacer la generación de vapor para dicho proceso de la empresa. Figura N°4

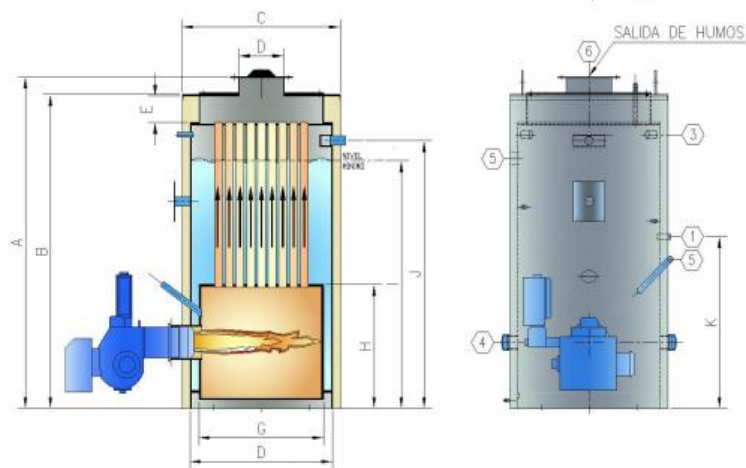


Figura 2. Caldera Pirotubular

Fuente: catálogo spirax sarco

Concepto 3: se presenta una caldera pirotubular vertical, con un quemador a gas con posicionamiento vertical, el calor generado se transmitirá hacia los tubos de humo para luego empezar con la generación de vapor. Figura N°5

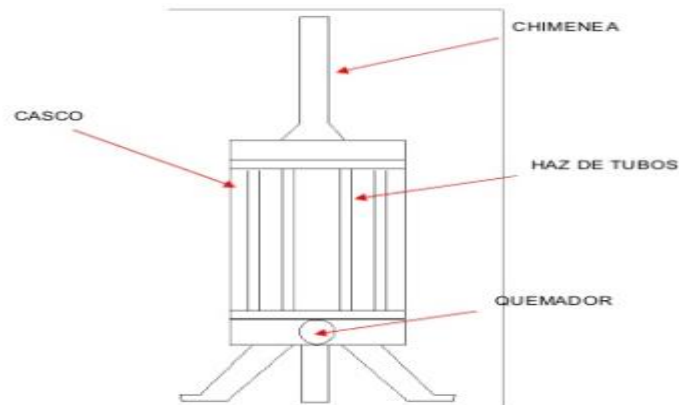


Figura 3. Caldera pirotubular vertical.

Fuente :<https://www.slideshare.net/osyupsac/mini-caldera-pirotubular>

Anexo N°6

DISEÑO CONFIGURACIONAL

CONFIGURACION N°1: En esta configuración se plantea una caldera pirotubular con posicionamiento vertical, con quemador dual, asimismo la ubicación del quemador también estará en posición vertical por la cual como se puede apreciar en la imagen se debe hacer una estructura para poder encajar el quemador. Figura N°6

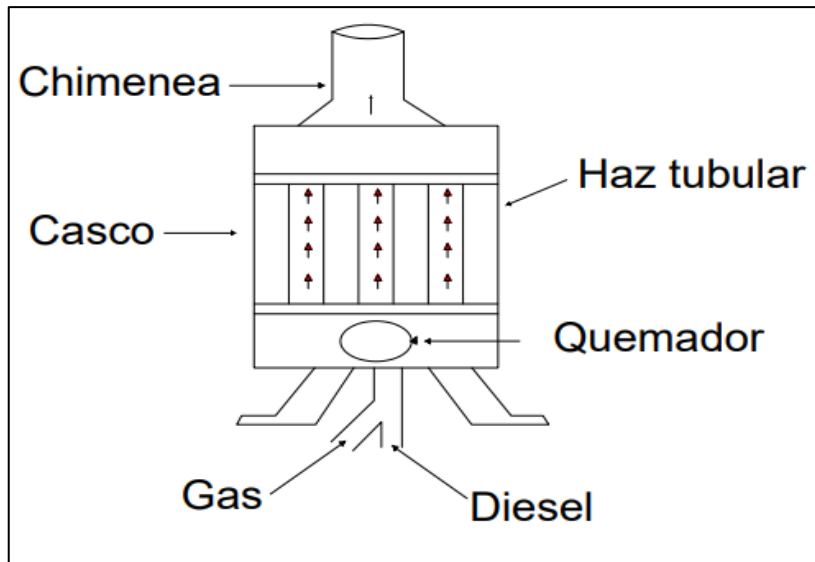


Figura 4. Caldera pirotubular posicionamiento vertical

CONFIGURACION N°1

Fuente: Elaboración propia

Configuración N°2: caldera pirotubular con posicionamiento vertical, con quemador en posición horizontal en función a la llama producida, alimentada con gas del producto del proceso de pirolisis de un gasificador de carbón.Figura N°7

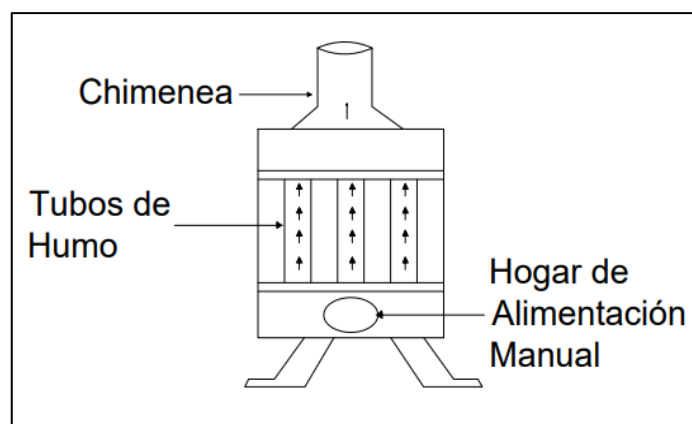


Figura 5. Caldera pirotubular vertical con quemador horizontal.

CONFIGURACION N°2

Fuente: Elaboración propia

Configuración N°3: Se tiene una caldera pirotubular de posicionamiento vertical con alimentación manual de carbón, en la cual la alimentación de combustible será controlada por una persona, con aumento de tiempo para el primer proceso por el prendido de caldera.

Figura N°8

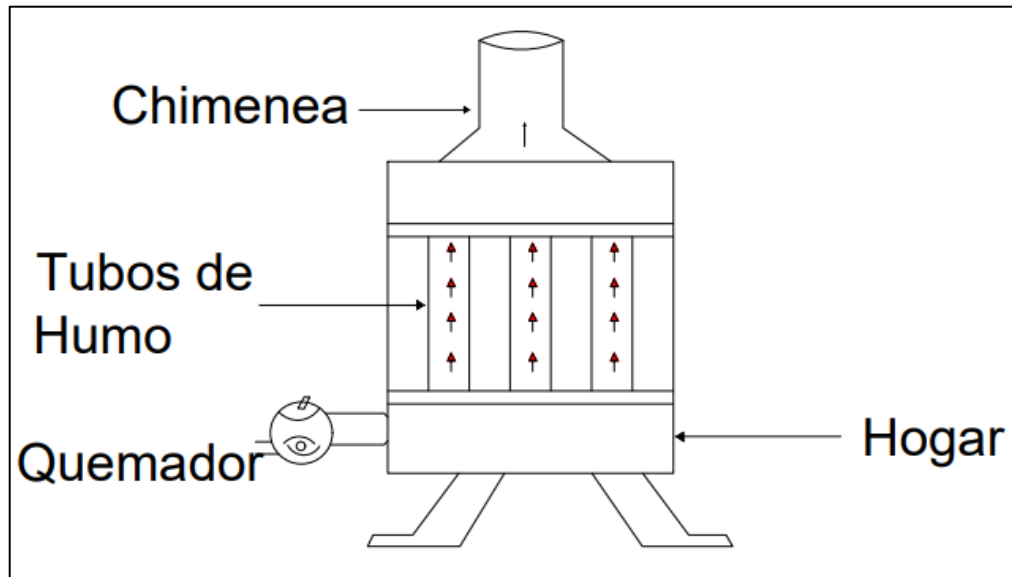


Figura 6. Caldera pirotubular vertical con alimentación manual de carbón.

CONFIGURACION N°3

Fuente: Elaboración propia

Anexo N°7

Formulario para de procedimiento de cálculos de los objetivos.

Rendimiento de la caldera: Podemos desarrollarlo de dos maneras habiendo dos métodos los cuales son de manera directa o indirecta.

Método de manera directa: El rendimiento se obtiene mediante dos mediciones: por un lado, la del caudal del fluido tanto de entrada como a la salida de la caldera y por el otro la de la energía del combustible. (Gonzales y otros, 2015)

$$\eta_{cd} = \frac{\dot{m}_{vs} * (H_{vs} - H_a)}{\dot{Q}_T} * 100 \quad \text{ecuacion (1)}$$

Parámetros:

⇒ η_{cd} : Eficiencia energética del caldero pirotubular (%)

⇒ \dot{Q}_T : Potencia total de los reactantes (aire + combustible) (KW).

⇒ \dot{m}_{vs} : Flujo másico del vapor sobrecalentado $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{seg}}\right)$.

⇒ H_{vs} : Entalpia especifica del vapor evacuado por el caldero $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$.

⇒ H_a : Entalpia especifica del agua de ingreso a la caldera $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)$.

Método de manera indirecta:

Evalúa el rendimiento instantáneo de la caldera, donde se hallarán las distintas perdidas que existe en la caldera, además no solo ayuda a evaluar el calor aportado por el combustible, sino que nos ayuda a mejorar la eficiencia energética. (Carbajal, 2013).

$$n_{caldera} = 100\% - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)\% \quad \text{ecuacion (2)}$$

Donde:

⇒ q_1 : Perdidas en el hogar [%]

⇒ q_2 : Perdidas por inquemados [%]

⇒ q_3 : Perdidas por combustión incompleta [%]

⇒ q_4 : Perdidas por purgas [%]

⇒ q_5 : Perdidas por convección [%]

⇒ q_6 : Perdidas por radiación [%]

Ratio de la combustión: Es la relación de la cantidad de aire contenida en la combustión del combustible. (Carbajal, 2013)

$$\frac{r_a}{c} = \frac{m_a}{m_c} \quad \text{ecuacion (3)}$$

Temperatura de los gases calientes y temperatura del hogar:

La temperatura de los gases calientes es la más alta del caldero, en cambio la del hogar es menor por 5°C, debido a la superficie del hogar. (Capcha, 2007)

Temperatura de los gases:

$$T_{gc} = \frac{Q_t}{m_{gc} * Cp_{gc}} \quad \text{ecuacion (4)}$$

Temperatura de hogar:

$$T_{hog} = T_{gc} - 5^{\circ}C \quad \text{ecuacion (5)}$$

Dimensionamiento de calibres de tuberías, el correcto dimensionamiento de una tubería de vapor, nos permite eliminar las posibles caídas de presión en el sistema, permitiendo que el flujo de vapor se distribuya en forma constante y a una velocidad promedio (Cengel, 2007).

El dimensionamiento de una tubería, sigue el siguiente procedimiento:

$$\dot{m}_v = \rho_v * V_v * A \quad \text{ecuacion (6)}$$

Parámetros:

⇒ \dot{m}_v : Flujo másico de vapor de circulación por la tubería $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

⇒ V_v : Velocidad del vapor $\left(\frac{m}{s}\right)$

⇒ A: Área transversal de la tubería (m^2)

$$A = \frac{\pi * d_i^2}{4} \quad \text{ecuacion (7)}$$

⇒ d_i : Calibre interior de la tubería [m]

$$d_i = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}}$$

Anexo N°8

Detalles del cálculo del primer objetivo.

Cálculo para determinación de capacidad de caldera:

- Consumo de combustible 450 kg/día carbón antracita
- Temperatura de vapor: 158.3 °C
- Temperatura hogar: 750 °C y $C_p=1.306$
- Temperatura del aire: 23°C y $C_p=1.006$

$$r_{a/c} = \frac{PCI - h_{gc}}{h_{gc} - h_{aire}} = \frac{2700 \text{ kJ/kg} - 783.6 \text{ kJ/kg}}{783.6 \text{ kJ/kg} - 23.54 \text{ kJ/kg}} = 34.49 \frac{Kgcbte}{Kgaire}$$

Entonces el flujo de combustible en horas de trabajo por día es:

$$\dot{m}_{cble} = 56.25 \text{ kg/h} = 0.0156 \text{ kg/s}$$

Hallando flujo másico gases de combustión:

$$\dot{m}_{gc} = 0.0156 * 35.4 = 0.5522 \text{ kg/s}$$

$$Q_u = 0.5522 * (726 - 218) = 280.54 \text{ Kw}$$

Hallando el flujo másico de vapor:

$$Q_u = \dot{m}_v (h_{gc} - h_{gc}) \quad \text{ecuacion (8)}$$

$$280.54 = \dot{m}_v (2743.39 - 96.30)$$

$$\dot{m}_v = 0.1057 \text{ Kg/s}$$

Hallando calor total:

$$Q_t = 0.0156 * (27000 + 34.49 * 23.54) = 433.87 \text{ Kw}$$

Hallando la eficiencia:

$$n = \frac{Q_u}{Q_t} \quad \text{ecuacion (9)}$$

$$n = 280.54 / 433.87 = \mathbf{64.66\%}$$

Hallando la capacidad en BHP:

$$\dot{m}_v = 0.1057 \text{ Kg/s} = 0.0157 * 3600 = 380.52 \text{ Kg/h} =$$

$$\text{Capac dad} = 380.52 / 15.66 = 24.29 \text{ BHP}$$

Hallando la sección transversal de la tubería de vapor:

$$\delta_{4.5} = 2.416 \text{ Kg/m}^3$$

$$D_{int} = 2.5 \text{ pulg} = 0.0635 \text{ m}$$

$$0.0635 = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}}$$

$$St = 3.17 * 10^{-3} m^3$$

Hallando la velocidad del vapor saturado:

$$\dot{m}_v = \rho_v * V_v * St$$

$$V_v = \frac{0.1057}{2.416 * 3.17 * 10^{-3}} = 13.80 m/s$$

Hallando la velocidad de los gases de chimenea:

$$\delta_{gc=200\text{ }^{\circ}c} = 0.748 Kg/m^3$$

$$Dn=200\text{ mm}=0.2m$$

$$0.2 = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}}$$

$$St = 0.0314 m^3$$

$$\dot{m}_{gc} = \rho_v * V_v * St \quad \text{ecuacion (10)}$$

$$V_{gc} = \frac{0.5522}{0.0314 * 0.748} = 23.51 m/s$$

Comprobando la capacidad de caldero de 60 BHP:

$$\dot{m}_v = \frac{60 * 15.66}{3600} = 0.261 kg/s$$

Hallando la sección transversal de la tubería de vapor:

$$\delta_{9.5} = 4.90 Kg/m^3$$

$$V_v=25\text{ m/s}$$

$$S_t = \frac{0.261}{4.90 * 25} = 2.12 * 10^{-3} m^3$$

Hallando el diámetro de tubería de vapor:

$$d_{\text{int}} = \sqrt{\frac{4 * 2.12 * 10^{-3}}{\pi}} = 0.052\text{m}$$

Hallando el flujo másico de combustible:

$$\dot{m}_{\text{cble}} = \frac{0.261 * (2775.14 - 96.30)}{(27000 + 34.40 * 26.91) * 64.66} = \frac{0.0387\text{kg}}{\text{s}} = 139.32\text{kg/h}$$

Hallando calor útil:

$$Q_u = 0.261 * (2775.14 - 96.30) = 699.96\text{Kw}$$

Hallando flujo másico gases de combustión:

$$\dot{m}_{gc} = 0.0387 * 35.4 = 1.239 \text{ kg/s}$$

Hallando la sección transversal

$$V_{gc} = 22 \text{ m/s}$$

$$\delta_{gc=200^\circ\text{C}} = 0.748 \text{ Kg/m}^3$$

$$S_t = \frac{1.239}{0.748 * 22} = 0.075\text{m}^2$$

Hallando el diámetro de tubería de chimenea:

$$d_{gc} = \sqrt{\frac{4 * 0.075}{\pi}} = 0.309\text{m}$$

Anexo N° 9

SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE UNA CALDERA

CAPACIDAD DE LA CALDERA

$$\dot{m}_{vapor} = 30 \text{ BHP} \left(\frac{15.66 \frac{kg}{hr}}{1 \text{ BHP}} \right) = 469.8 \frac{kg}{hr} = 0.1305 \frac{kg}{s}$$

Datos de entrada

$$T_{hog} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{ch} = 208 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{vap} = 158 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{ag} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{man} = 5 \text{ bar}$$

$$P_{abs} = 6 \text{ bar}$$

$$\eta_{cald} = 80\%$$

Por los requerimientos de temperatura y presión a la salida se tendrá vapor sobrecalentado.

BALANCE DE ENERGÍA

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{perd} \text{ ecuacion (10)}$$

\dot{Q}_{ent} : Calor de entrada, (KW)

\dot{Q}_u : Calor útil que se entrega al agua, (KW)

\dot{Q}_{ch} : Calor de los gases de combustión que se pierden en la atmosfera, (KW)

\dot{Q}_{perd} : Calor perdido por convección y radiación al medio ambiente, (KW)

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{aire} \text{ ecuacion (11)}$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{vap}(h_{Sat,ag} - h_{ent,ag}) + \dot{m}_{vap}h_{fg} + \dot{m}_{vap}(h_{sal,vap} - h_{Sat,vap}) \text{ ecuacion (12)}$$

$$\dot{Q}_{ch} = (\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{aire})Cp_{ch}(T_{chimenea}) \quad \text{ecuacion (13)}$$

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb}(PCI) \quad \text{ecuacion (14)}$$

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire}Cp_{aire}(T_{aire}) \quad \text{ecuacion (15)}$$

$$\dot{Q}_{perd} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad \text{ecuacion (16)}$$

Calor útil (\dot{Q}_u)

El calor útil es la energía que se entrega al agua de alimentación para elevar su temperatura desde $T_{ag} = 23^\circ C$ hasta la temperatura de saturación T_{sat} a una presión $P_{man} = 5 \text{ bar}$ y luego llegar a vapor sobrecalentado a $T_{vap} = 158^\circ C$ con la misma presión. Por lo cual el agua de alimentación pasa por tres procesos primero calentamiento, luego cambio de fase y finalmente sobrecalentamiento manteniendo la presión de 5 bar. El calor necesario para producir 469.8kg/hr de vapor en estas condiciones se calcula con la ecuación siguiente:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{vap}[(h_{Sat,ag} - h_{ent,ag}) + h_{fg} + (h_{sal,vap} - h_{Sat,vap})]$$

Donde:

\dot{m}_{vap} : Flujo masico de vapor de agua, (kg/s)

$h_{Sat,ag}$: Entalpia de saturación del agua a la presión de trabajo, (KJ/kg)

$h_{ent,ag}$: Entalpia del agua a la entrada de la caldera, (KJ/kg)

h_{fg} : Entalpia de vaporización, (KJ/kg)

$h_{sal,vap}$: Entalpia del vapor a la salida de la caldera, (KJ/kg)

$h_{Sat,vap}$: Entalpia del vapor saturado, (KJ/kg)

Para $P_{man} = 5 \text{ bar}$: Fuente: (Termodinámica, 7 Ed, Yunus Cengel, pag. 916)

$$T_{Sat,ag} = 151.83 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_{Sat,ag} = 640.09 \text{ KJ/kg}$$

$$h_{ent,ag} = 96.464 \text{ KJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2108.0 \text{ KJ/kg}$$

$$h_{sal,vap} = 2761.9 \text{ KJ/kg}$$

$$h_{Sat,vap} = 2748.1 \text{ KJ/kg}$$

Reemplazando valores:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_u &= \left(0.1305 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) [(640.09 - 96.464) + 2108.0 + (2761.9 - 2748.1)] \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \\ &= 347.838 \text{ KW} \end{aligned}$$

CÁLCULO DE FLUJOS MASICOS

La masa de los gases que salen por la chimenea está compuesta por los productos de la combustión. Para este caso se tomará como combustible al metano.

Estequiometria de la combustión

Para determinar la relación aire combustible se toma la combustión estequiométrica, para la cual los productos de la combustión son Dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) y nitrógeno (N_2), en la Tabla 3.5 se tiene un listado de combustibles con varios parámetros resultantes en una reacción estequiométrica.

Tabla 17. Molecular mass, stoichonometric air fuel ratios, and produc mole fraction and quality.

Fuel	Chemical Formula	M (kg/kmole)	AF_s	a_s	y_{CO_2}	$y_{\text{H}_2\text{O}}$	x_{eq}
Hydrogen	H_2	2.02	34.06	0.50	0.000	0.347	0.0061
Methane	CH_4	16.04	17.12	2.00	0.095	0.190	0.139
Ammonia	NH_3	17.03	6.05	0.75	0.000	0.311	0.0072
Methanol	CH_4O	32.04	6.43	1.50	0.116	0.231	0.109
Propane	C_3H_8	44.09	15.57	5.00	0.116	0.155	0.178
Ethanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	46.07	8.94	3.00	0.123	0.184	0.145
Nitromethane	CH_3NO_2	61.04	1.69	0.75	0.158	0.237	0.105

Table B.1 Properties of Various Ideal Gases at 298 K (SI Units)

Gas	Chemical formula	M (kg/kmol)	R (kJ/(kg K))	c_{po} (kJ/(kg K))	c_{vo} (kJ/(kg K))	γ
Air		28.97	0.287	1.004	0.717	1.40
Ethane	C_2H_6	30.07	0.27650	1.7662	1.4897	1.186
Ethanol	C_2H_5OH	46.069	0.18048	1.427	1.246	1.145
Ethylene	C_2H_4	28.054	0.29637	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	4.003	2.07703	5.1926	3.1156	1.667

Tomando los datos para el metano de la Tabla 3.5 y las propiedades del aire de la Tabla B.1 Se tiene que:

$$M_f = 16.04 \frac{kg}{kmol}$$

$$M_a = 28.97 \frac{kg}{kmol}$$

Donde:

M_a : Masa molecular del aire, (kg/kmol)

M_f : Masa molecular del combustible, (kg/kmol)

Y la relación aire-combustible para el metano es:

$$AF_s = R_{a-c} = 17.12$$

Ahora se calcula la masa molar de la mezcla de gases con la ecuación siguiente:

$$M_{mix} = y_a M_a + y_f M_f \quad \text{ecuacion (17)}$$

Donde:

M_{mix} : Masa molar de la mezcla de gases, (kg/kmol)

y_a : Es la proporción molar de aire en la mezcla, (Adim)

y_f : Es la proporción molar de combustible en la mezcla, (Adim)

$$y_f = \frac{n_f}{n_f + n_a} \quad \text{ecuacion (18)}$$

Donde:

n_f : Numero de moles de combustible, (kmol)

n_a : Numero de moles de aire, (kmol)

La relación entre la masa molar, la masa y el número de moles es:

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad \text{ecuacion (19)}$$

Donde:

n_i : Numero de moles de la sustancia, (kmol)

m_i : Masa de la sustancia, (kg)

M_i : Masa molar de la sustancia, (kg/kmol)

Con la ecuación anterior la proporción molar de combustible se puede reescribir como:

$$y_f = \frac{m_f/M_f}{m_a/M_a + m_f/M_f} = \frac{\frac{1}{M_f}}{\frac{R_{a-c}}{M_a} + \frac{1}{M_f}} \quad \text{ecuacion (20)}$$

Lo cual al sustituir valores da:

$$y_f = \frac{\frac{1}{16.04 \frac{kg}{kmol}}}{\frac{17.12}{28.97 \frac{kg}{kmol}} + \frac{1}{16.04 \frac{kg}{kmol}}} = 0.0954$$

La proporción molar de aire es entonces:

$$y_a = 1 - y_f$$

$$y_a = 1 - 0.0954 = 0.9046$$

Finalmente, la masa molar de la mezcla es:

$$M_{mix} = (0.9046) \left(28.97 \frac{kg}{kmol} \right) + (0.0954) \left(16.04 \frac{kg}{kmol} \right) = 27.7365 \frac{kg}{kmol}$$

Tabla N° 18

Tabla 18. curva del coeficiente de termodinámica de las propiedades de combustión

Table C.2 Curve-Fit Coefficients for Thermodynamic Properties of Combustion Products ($1000 \leq T \leq 3000$ K)

Species	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
CO ₂	0.24007797E + 01	0.87350957E - 02	-0.66070878E - 05	0.20021861E - 08	0.63274039E - 15	-0.48377527E + 05	0.96951457E + 01
H ₂ O	0.40701275E + 01	-0.11084499E - 02	0.41521180E - 05	-0.29637404E - 08	0.80702103E - 12	-0.30279722E + 05	-0.32270046E + 00
N ₂	0.36748261E + 01	-0.12081500E - 02	0.23240102E - 05	-0.63217559E - 09	-0.22577253E - 12	-0.10611588E + 04	0.23580424E + 01
O ₂	0.36255985E + 01	-0.18782184E - 02	0.70554544E - 05	-0.67635137E - 08	0.21555993E - 11	-0.10475226E + 04	0.43052778E + 01
CO	0.37100928E + 01	-0.16190964E - 02	0.36923594E - 05	-0.20319674E - 08	0.23953344E - 12	-0.14356310E + 05	0.2955535E + 01
H ₂	0.30574451E + 01	0.26765200E - 02	-0.58099162E - 05	0.55210391E - 08	-0.18122739E - 11	-0.98890474E + 03	-0.22997056E + 01
H	0.25000000E + 01	0	0	0	0	0.25471627E + 05	-0.46011762E + 00
O	0.29464287E + 01	-0.16381665E - 02	0.24210316E - 05	-0.16028432E - 08	0.38906964E - 12	0.29147644E + 05	0.29639949E + 01
OH	0.38375943E + 01	-0.10778858E - 02	0.96830378E - 06	0.18713972E - 09	-0.22571094E - 12	0.36412823E + 04	0.49370009E + 00
NO	0.40459521E + 01	-0.34181783E - 02	0.79819190E - 05	-0.61139316E - 08	0.15919076E - 11	0.97453934E + 04	0.29974988E + 01

Para determinar el cp de los gases de escape usamos la Tabla C.2 y la ecuación siguiente:

$$\frac{Cp}{R} = \frac{\overline{Cp}}{R_u} = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4 \quad \text{ecuacion (21)}$$

Empleando un programa de cálculo para determinar el Cp con la ecuación anterior para los gases de combustión del metano a la temperatura $T_{ch} = 208$ °C. Se tiene:

$$Cp_{ch} = 1.1431 \left(\frac{kJ}{Kg K} \right) \quad \text{ecuacion (22)}$$

El poder calorífico inferior ($PCI = q_{lhc}$) para el metano se obtiene de la tabla 4.1.

Tabla N° 19

Tabla 19. entalpia de formación, entropía, baja y alta temperatura de combustión, y máxima energía de combustión.

Enthalpy of Formation, Entropy, Lower/Higher Heat of Combustion, and Maximum Available Energy of Combustion ¹						
Fuel		\bar{h}_f° (MJ/kmol)	\bar{s}_{298}° (kJ/(kmol K))	q_{hbc} (MJ/kg)	q_{hhc} (MJ/kg)	a_o (MJ/kg)
CH ₄ (g)	Methane	-74.9	186.2	50.01	55.5	52.42
C ₃ H ₈ (g)	Propane	-103.9	269.9	46.36	50.3	49.16
C ₇ H ₁₇ (l)	Gasoline ²	-305.6	345.8	44.51		47.87
C ₈ H ₁₈ (l)	Octane	-249.96	360.8	44.43	47.9	47.67
C _{14.4} H _{24.9} (l)	Diesel ²	-174.0	525.9	42.94		45.73
C ₁₅ H ₃₂ (l)	Pentadecane	-428.9	587.5	43.99	47.3	47.22
CH ₄ O (l)	Methanol	-239.1	126.8	19.91	22.7	22.68
C ₂ H ₆ O (l)	Ethanol	-277.2	160.7	26.82	29.7	29.71
CH ₃ NO ₂ (l)	Nitromethane	-113.1	171.8	10.54	11.6	12.43
H ₂ (g)	Hydrogen	0.0	130.6	119.95	141.6	119.52
C ₂ H ₂ (g)	Acetylene	226.7	200.8	48.22	49.9	48.58
C ₂ N ₂ (g)	Cyanogen	309.1	241.5	21.06	21.0	21.29
NH ₃ (g)	Ammonia	-45.7	192.6	18.61	22.5	20.29
C ₆ H ₆ (l)	Benzene	48.91	173.0	40.14		42.14
C ₁₀ H ₈ (s)	Naphthalene	78.1	166.9	38.86	40.3	40.84
C (s)	Graphite	0.0	5.7	32.76		33.70
C ₁₇₆ H ₁₄₄ O ₈ N ₃ (s)	Coal ²	-10,000.0	3000.0	31.57		33.57

¹Based on equilibrium water quality, lean combustion at $\phi = 0.01$, $T_o = 298$ K, $P_o = 1.013$ bar and unmixed reactants.

²Estimated for typical fuel.

Tabla N° 20

Las propiedades del aire a diferentes temperaturas se obtienen de la Tabla A.15

Tabla 20. Las propiedades del aire a diferentes temperaturas se obtienen de la Tabla A.15

TABLA A-15							
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Para una temperatura del aire:

$$T_{\text{aire}} = 25 ^\circ\text{C}$$

$$c_{p\text{aire}} = 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$$

Sabiendo que durante la combustión se quema el combustible con aire. El calor de entrada es:

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = \dot{Q}_{\text{comb}} + \dot{Q}_{\text{aire}} \quad \text{ecuacion (23)}$$

Y el calor en los gases de la chimenea es:

$$\dot{Q}_{ch} = (\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{aire})Cp_{ch}(T_{ch}) \quad \text{ecuacion (24)}$$

El calor suministrado por el combustible y el aire se calcula con las ecuaciones siguientes:

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb}(PCI) \quad \text{ecuacion (25)}$$

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire}Cp_{aire}(T_{aire}) \quad \text{ecuacion (26)}$$

Reemplazando en la ecuación anterior

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}_{comb}(PCI) + \dot{m}_{aire}Cp_{aire}(T_{aire}) \quad \text{ecuacion (27)}$$

Sabiendo que la relación aire combustible es:

$$R_{a-c} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{comb}} \quad \text{ecuacion (28)}$$

Empleando la relación aire combustible:

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}_{comb}[(PCI) + R_{a-c}Cp_{aire}(T_{aire})] \quad \text{ecuacion (29)}$$

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{comb}(1 + R_{a-c})Cp_{ch}(T_{ch}) \quad \text{ecuacion (30)}$$

Del balance de energía el calor de entrada es:

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{perd} \quad \text{ecuacion (31)}$$

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{comb}[(PCI) + R_{a-c}Cp_{aire}(T_{aire})] \\ &= \dot{Q}_u + (\dot{m}_{comb}(1 + R_{a-c})Cp_{ch}(T_{ch})) + \dot{Q}_{perd} \quad \text{ecuac (32)} \end{aligned}$$

Como no se conoce la cantidad exacta de calor que se pierde (\dot{Q}_{perd}), se toma el valor de la eficiencia que se ha asumido, quedando la ecuación:

$$\eta_{cald} \dot{m}_{comb} [(PCI) + R_{a-c} Cp_{aire}(T_{aire})] = \dot{Q}_u + (\dot{m}_{comb}(1 + R_{a-c}) Cp_{ch}(T_{ch}))$$

ecuacion (33)

Despejando para la masa del combustible:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{Q}_u}{\eta_{cald} [(PCI) + R_{a-c} Cp_{aire}(T_{aire})] - (1 + R_{a-c}) Cp_{ch}(T_{ch})} \quad \text{ecuacion (34)}$$

Reemplazando datos:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{comb} &= \frac{347.838 \text{ KW}}{(0.8) \left[(50010 \text{ KJ/kg}) + (17.12) \left(1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right) (25^\circ\text{C}) \right] - (18.12) \left(1.1431 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right) (208^\circ\text{C})} \\ \dot{m}_{comb} &= 0.0097 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

La masa de aire seria:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{aire} &= R_{a-c} * \dot{m}_{comb} \\ \dot{m}_{aire} &= (17.12) \left(0.0097 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 0.166 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

La masa de los gases de combustión seria:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gc} &= \dot{m}_{comb} + \dot{m}_{aire} \\ \dot{m}_{gc} &= 0.0097 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0.166 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0.1757 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Calor en la chimenea (\dot{Q}_{ch})

Empleando las propiedades de los gases de escape el calor contenido en ellos es:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{gc} C_{p_{ch}}(T_{ch}) \quad \text{ecuacion (35)}$$

$$\dot{Q}_{ch} = \left(0.1757 \frac{kg}{s}\right) \left(1.1431 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}\right) (208 \text{ } ^\circ C) = 41.775 \text{ KW}$$

Calor perdido a la atmosfera (\dot{Q}_{perd})

$$\dot{Q}_{perd} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad \text{ecuacion (36)}$$

EL PROBLEMA DE DISEÑO

La transferencia de calor se da entre 2 fluidos, los gases dentro de los tubos y agua que rodea los tubos. Para este trabajo se desea construir una caldera pirotubular vertical para lo cual la transferencia de calor entre el agua y los gases de escape se hace a través de tubos verticales. El problema de diseño consiste en determinar el área de transferencia de calor, y con ellos determinar el diámetro, la longitud y la cantidad de tubos, parámetros que impactan en las dimensiones de la caldera. La capacidad ha sido determinada para ser 30 BHP.

Consideraciones de diseño

- La caldera al ser pirotubular los gases de combustión pasaran dentro de los tubos y el agua a calentar rodeara los tubos.
- Como la transferencia de calor se da entre un gas y un líquido se logrará un mayor rendimiento si el conducto del gas tiene menor diámetro y haya una mayor área de transferencia de calor. Esto es debido a que los gases tienen conductividades térmicas muy bajas.

Proceso de diseño

Para los cálculos termodinámicos de la caldera en general se debe cumplir con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{m}_{vap}(h_{sal,vap} - h_{ent,vap}) \quad \text{ecuacion (37)}$$

$$\dot{Q}_{gc} = \dot{m}_{gc}Cp_{gc}(T_{ent,gc} - T_{sal,gc}) \quad \text{ecuacion (38)}$$

Estas ecuaciones definen el cambio de temperatura de ambos fluidos. En estado estacionario flujo de calor a través de la superficie de los tubos se puede expresar como:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{vap} = \dot{Q}_{gc} = UA_s\Delta T_m \quad \text{ecuacion (39)}$$

Donde:

U : Coeficiente total de transferencia de calor, (W/m² °C)

A_s : Área superficial efectiva de transferencia de calor, (m²)

ΔT_m : Diferencia media de temperatura, (°C)

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula las propiedades termo físicas de cada fluido a la temperatura promedio.

PARA LOS GASES DE ESCAPE (h_i)

Para los gases de escape que pasan dentro del tubo se tiene la Tabla A.18

Tabla N° 21

Tabla 21. tabla de propiedades físicas de los gases de combustión.

A.18. Tabla de las propiedades físicas de los gases de combustión a $p=101325\text{Pa}$, con composición volúmica de los gases: $\text{CO}_2=13\%$; $\text{H}_2\text{O}=11\%$; $\text{N}_2=76\%$

t [°C]	ρ [Kg/m³]	C_p [KJ/Kg*°C]	$k \cdot 10^2$ [W/m*K]	$a \cdot 10^2$ [m²/h]	$\mu \cdot 10^6$ [N*s/m²]	$\nu \cdot 10^6$ [m²/s]	Pr
0	12,950	1,05	2,28	6,08	15,78	12,20	0,72
100	0,9500	1,07	3,13	11,10	20,39	21,54	0,69
200	0,7480	1,09	4,01	17,6	24,49	32,80	0,67
300	0,6170	1,12	4,84	25,16	28,23	45,81	0,65
400	0,5250	1,15	5,7	35,04	31,68	60,38	0,64
500	0,4570	1,18	65,593	43,61	43,85	76,30	0,63
600	0,4050	1,21	7,42	54,32	37,86	93,61	0,62
700	0,3630	1,24	8,27	66,17	40,69	112,10	0,61
800	0,3290	1,26	9,15	79,09	43,37	131,80	0,60
900	0,3010	1,29	10,01	92,87	45,91	152,50	0,59
1000	0,2750	1,31	10,89	109,21	48,36	174,30	0,58
1100	0,2570	1,32	11,75	124,37	50,70	197,10	0,57
1200	0,2400	1,34	12,62	141,27	52,99	221,00	0,56
1300	0,221	1,36	13,58	160,04	55,53	247,55	0,55
1400	0,202	1,37	14,55	178,82	58,07	274,11	0,54
1500	0,183	1,39	15,53	197,61	60,61	300,67	0,53
1600	0,164	1,41	16,50	216,61	63,14	327,23	0,52
1700	0,145	1,43	17,46	235,19	65,68	353,79	0,51
1800	0,126	1,45	18,43	253,98	68,22	380,36	0,50
1900	0,107	1,47	19,40	272,77	70,76	406,94	0,49
2000	0,088	1,48	20,34	291,56	73,30	433,53	0,48

Interpolando las propiedades de los gases de escape a la temperatura promedio se tiene:

$$T_{prom} = \frac{750 + 208}{2} = 479 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{gc} = 0.4713 \text{ kg/m}^3$$

$$k_{gc} = 0.0638 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

$$Pr_{gc} = 0.6321$$

$$\nu_{gc} = 7.2957 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cálculo del número de Reynolds para los gases de escape

Para el cálculo se asume un diámetro de tubería de 1 1/2" (Anexo 1) y una velocidad $10 \leq U_{fluido} \leq 25 \text{ m/s}$ (Fernández Diez, 2008).

$$Re = \frac{V_{gc} D_i}{\nu_{gc}} \quad \text{ecuacion (40)}$$

Donde:

Re : Numero de Reynolds, (adim)

D_i : Diámetro interior de la tubería = 0.0323 m

ν : Viscosidad cinemática de los gases de escape, (m^2/s)

Reemplazando se tiene:

$$Re = \frac{\left(17.5 \frac{m}{s}\right) (0.0323 m)}{(7.2957 \times 10^{-5} m^2/s)} = 7747.7$$

Cálculo del número de Nusselt para los gases de escape

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k_{gc}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{ecuacion (42)}$$

$$h_i = \frac{k_{gc}}{D_i} Nu \quad \text{ecuacion (43)}$$

Donde:

Pr : Numero de Prandtl, (adim)

Reemplazando se tiene:

$$Nu = 0.023 (7747.7)^{0.8} (0.6321)^{0.4} = 24.739$$

$$h_i = \frac{\left(0.0638 \frac{W}{m^{\circ}C}\right)}{(0.0323 m)} (24.73) = 48.8546 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

PARA EL AGUA (h_o)

Debido a que existe cambio de fase se emplea la correlación de Foster-Zuber, para ebullición nuclear, se halla $h_o = h_{nb}$:

$$h_{nb} = 0.00122 * \left[\frac{k_L^{0.79} * Cp_L^{0.45} * \rho_L^{0.49}}{\sigma^{0.5} * \mu_L^{0.29} * \lambda^{0.24} * \rho_v^{0.24}} \right] * (T_p - T_{sat})^{0.24} \\ * (p_{pared} - p_{sat})^{0.75} \quad \text{ecua (44)}$$

Donde:

h_{nb} : Coeficiente de ebullición nuclear, W/m² °C

k_L : Conductividad térmica del líquido saturado = 0.6816 W/m °C

Cp_L : Capacidad calorífica del líquido caliente = 4316.3 J/kg °C

ρ_L : Densidad del líquido = 914.92 kg/m³

μ_L : Viscosidad del líquido = 1.8062*10⁻⁴ N.s/m²

λ : Calor latente de vaporización h_{fg} =2108.3*10³ J/kg

ρ_v : Densidad del vapor de agua = 2.6759 kg/m³

T_p : Temperatura de la superficie de la pared caliente = 180 °C

T_{sat} : Temperatura de saturación del líquido hirviendo = 151.83 °C

p_{pared} : Presión de saturación a la temperatura de la pared, $T_p = 85.81*10^5$ N/m²

p_{sat} : Presión de saturación correspondiente a $T_{sat} = 5 * 10^5$ N/m²,

σ_v : Tensión superficial del vapor generado = 0.0484 N/m,

$$h_{nb} \\ = 0.00122 * \left[\frac{(0.6816)^{0.79} * (4316.3)^{0.45} * (914.92)^{0.49}}{(0.0484)^{0.5} * (1.8062 * 10^{-4})^{0.29} * (2108.3 * 1000)^{0.24} * (2.6759)^{0.24}} \right] \\ * (180 - 151.83)^{0.24} * (10.02 * 10^5 - 5 * 10^5)^{0.75} \\ h_{nb} = 0.00122 * \left[\frac{902.33}{0.2199 * 0.0821 * 32.9416 * 1.266} \right] * 2.228 * 18859 = 61434 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \\ h_o = h_{nb} = 61434 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Usando la correlación de Zuber para estimar el flujo térmico crítico:

$$q_c = 0.131 \lambda [\sigma g (\rho_L - \rho_v) \rho_v^2]^{1/4} \quad \text{ecuacion (45)}$$

λ : Calor latente de vaporización $h_{fg}=2108.3 \cdot 10^3$ J/kg

$$\begin{aligned} q_c &= 0.131 (2108.3 \cdot 10^3) [(0.0484)(9.81)(914.92 - 2.6759)(2.6759)^2]^{1/4} \\ &= 2061 \cdot 10^3 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

Flujo térmico específico:

$$Flujo_{espec} = (180 - 151.83) \cdot 61434 = 1730 \cdot 10^3 \frac{W}{m^2}$$

COEFICIENTE TOTAL DE TRASFERENCIA DE CALOR

$$\frac{1}{UA_s} = R_{total} = \frac{1}{U_i n A_i} = \frac{1}{U_o n A_o} \quad \text{ecuacion (46)}$$

Donde:

R : Resistencia térmica total, ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

U_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección dentro de los tubos, ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

U_o : Coeficiente de transferencia de calor por convección fuera de los tubos, ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

A_i : Área superficial dentro de las tuberías, (m^2)

A_o : Área superficial fuera de las tuberías, (m^2)

n : Numero de tubos, (adimensional)

Considerando la incrustación dentro y fuera de los tubos se tiene que la a resistencia total es:

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{tub} L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad \text{ecuacion (47)}$$

Donde:

k_{tub} : Conductividad térmica del material = 51.9 W/m °C

L : Longitud del tubo, (m)

h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección dentro de los tubos, (W/m² °C)

h_o : Coeficiente de transferencia de calor por convección fuera de los tubos, (W/m² °C)

$R_{f,i}$: Factor de incrustación, (m² °C/W)

Para el ensuciamiento causado por los gases de combustión

$$R_{f,i} = 0.009 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$$

Para considerar el efecto de incrustación del agua, se considera 0.2 mm de espesor con lo cual se tiene:

$$R_{incrustacion} = \frac{L}{k A_o} = \frac{R_{f,o}}{A_o} \quad \text{ecuacion (48)}$$

$$R_{incrustacion} = \frac{0.002 \text{ m}}{\left(2.9 \frac{\text{W}}{\text{m °C}}\right) A_o} = \frac{6.896 \times 10^{-4}}{A_o}$$

$$R_{f,o} = 6.896 \times 10^{-4} \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$$

Coeficiente total de transferencia de calor (U)

Para tubería sin aletas y los suficientemente delgada el (R_{total}) se puede simplificar a:

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{R_{f,i}}{A_s} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{tub} L} + \frac{R_{f,o}}{A_s} + \frac{1}{h_o A_s} \quad \text{ecuacion (49)}$$

Sabiendo que el área superficial de una tubería es:

$$A_s = \pi D_o L$$

$$\frac{A_s}{D_o} = \pi L$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{R_{f,i}}{A_s} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 \frac{A_s}{D_o} k_{tub}} + \frac{R_{f,o}}{A_s} + \frac{1}{h_o A_s}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{R_{f,i}}{A_s} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2 \frac{A_s}{D_o} k_{tub}} + \frac{R_{f,o}}{A_s} + \frac{1}{h_o A_s}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{R_{f,i}}{A_s} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2 A_s k_{tub}} + \frac{R_{f,o}}{A_s} + \frac{1}{h_o A_s}$$

$$R_{total} = \frac{1}{A_s} \left(\frac{1}{h_i} + R_{f,i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2 k_{tub}} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o} \right)$$

$$R_{total} = \frac{1}{U A_s} = \frac{1}{A_s} \left(\frac{1}{h_i} + R_{f,i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2 k_{tub}} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o} \right)$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + R_{f,i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2 k_{tub}} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o} \right)}$$

Reemplazando:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{48.8546} + 0.009 + \frac{(0.0323) \ln(0.0381/0.0323)}{2(51.9)} + 6.896 \times 10^{-4} + \frac{1}{61434} \right)}$$

$$= 33.0738 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Cálculo de la diferencia media de temperatura en la caldera

Método LMTD

Cuando se conocen las temperaturas de entrada y de salida de los fluidos se puede aplicar el método LMTD para determinar el cambio de temperatura del agua que se desplaza fuera de los tubos. En este método se calcula la diferencia media logarítmica de temperatura (ΔT_{ml}), dependiendo del tipo de construcción de la caldera la temperatura ΔT_1 y ΔT_2 se calculan de diferente manera. En este caso la caldera pirotubular vertical será de flujo paralelo, pues la entrada de agua será desde la parte inferior, mientras que el aire- combustible es inyectado desde la parte superior llegando hasta el fondo de la caldera luego por los tubos verticales los gases de escape subirán desde abajo y saldrán por la parte superior hacia un costado de la caldera como se muestra en la Figura 9

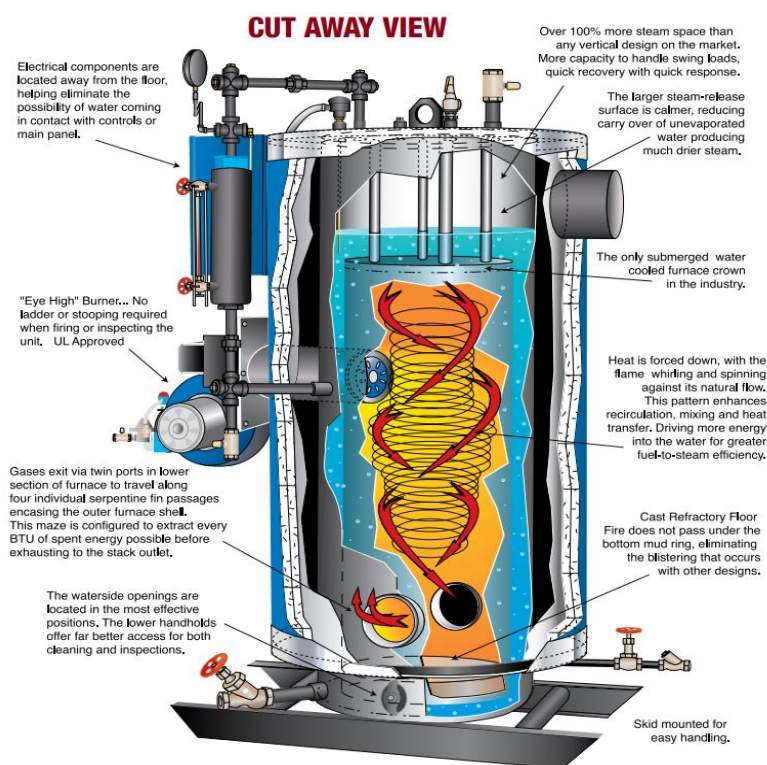


Figura 7. Caldera Pirotubular Vertical.

Figura N° 9. Caldera pirotubular vertical

Para calcular ΔT_{ml} se emplea la ecuación siguiente

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad \text{ecuacion (50)}$$

Donde:

ΔT_{ml} : Diferencia media logarítmica de temperatura, ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_1 : Diferencia de temperatura a la entrada, ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_2 : Diferencia de temperatura a la salida, ($^{\circ}\text{C}$)

Para el flujo paralelo las diferencias de temperatura son:

$$\Delta T_1 = T_{hog} - T_{ag}$$

$$\Delta T_2 = T_{ch} - T_{vap}$$

Reemplazando valores:

$$\Delta T_1 = 750^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C} = 727^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 208^{\circ}\text{C} - 158^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto, el ΔT_{ml} es:

$$\Delta T_{ml} = \frac{727^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}}{\ln(727^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C})} = 252.95^{\circ}\text{C}$$

Área de transferencia de calor

De la ecuación XX, despejando para el área de la superficie de transferencia de calor efectiva

$$A_s = \frac{\dot{Q}_u}{U\Delta T_{ml}} \quad \text{ecuacion (41)}$$

$$A_s = \frac{347838 \text{ W}}{\left(33.0738 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}\right) (252.95^{\circ}\text{C})} = 41.58 \text{ m}^2$$

La relación entre el área superficial y el número de tubos es:

$$A_s = \pi n D_o L_{tub} \quad \text{ecuacion (42)}$$

Donde:

D_o : Diámetro exterior de la tubería, (m)

L_{tub} : Longitud de la tubería, (m)

Tomando la longitud de la tubería de 2 m el número de tubos se calcula con la ecuación siguiente:

$$n = \frac{A_s}{\pi D_o L_{tub}} \quad \text{ecuacion (43)}$$

Reemplazando lo valores se tiene:

$$n = \frac{41.58 \, m^2}{\pi(0.0381 \, m)(2 \, m)} = 174.6$$

Figura N° 10: diseño preliminar de la caldera.

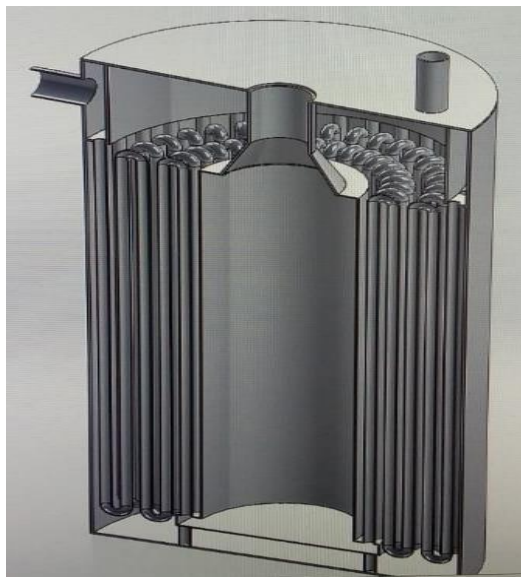


Figura 8.diseño intercambiador de calor.

Fuente: Elaboración propia.

Calculo estructural

Parte PG-101.1, la superficie de calefacción de la caldera, corresponde a las superficies del sistema de trasferencia de calor que están en contacto con la llama o los productos de combustión. Lo que en resumidas cuentas para una caldera de tipo piro tubular de hogar integrado y cámara de gases al exterior del equipo, equivale al área superficial interna de los tubos de humos y el tubo hogar, y se calcula de la siguiente manera.

$$A_s = A_{hog} + A_{tub}$$

$$A_{hog} = \pi D_{hog} L_{ho}$$

$$A_{tub} = n \pi D_o L_{tub}$$

Donde:

A_s : Área superficial de transferencia de calor, (m²)

A_{hog} : Área superficial del hogar, (m²)

A_{tub} : Área superficial total de los tubos, (m²)

D_{hog} : Diámetro del hogar, (m)

L_{hog} : Longitud del hogar, (m)

D_{tub} : Diámetro de la tubería, (m)

L_{tub} : Longitud de la tubería, (m)

n : Numero de tubos

Despejando para determinar el número de tubos se tiene:

$$n = \frac{A_s - (\pi D_{hog} L_{ho})}{\pi D_o L_{tub}}$$

Asumiendo las dimensiones del hogar como: 0.5 m para el diámetro y 1.8 m para la longitud y reemplazando en la ecuación anterior, se tiene:

$$n = \frac{(41.58 \text{ m}^2) - (\pi(0.5 \text{ m})(1.8 \text{ m}))}{\pi(0.0381 \text{ m})(1.8 \text{ m})} = 179.8677$$

Lo que se aproxima a 180 tubos para ala caldera vertical. Además, por la disposición que tienen los tubos has sido distribuidos alrededor del hogar en círculos concéntricos de 36 tubos (ver figura siguiente) con lo cual se logra tener 5 pasos para el flujo de los gases de escape.

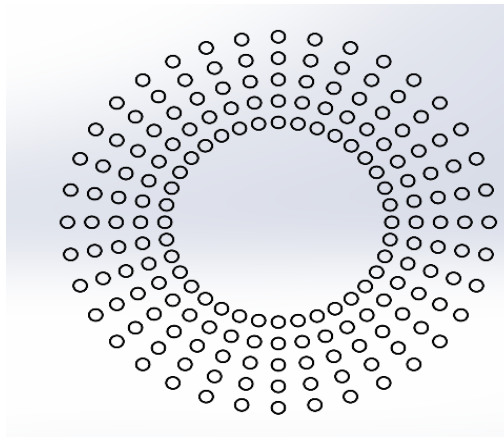


Figura 9. Disposición de tubos alrededor del hogar

Fuente: Elaboración Propia.

Materiales para la caldera

Para la parte estructural se empleará el acero A36 de la tabla N° 22

Tabla 22. estructura de acero americano, especificaciones y equivalentes.

Structural Steels to American Specifications and Their Equivalent BS and DIN Standards								
American Specifications							BS Specification	DIN Specification
Designation	Items	C (%)	Tensile (kpsi)	Yield (kpsi)	Tensile (MPa)	Yield (MPa)		
A 36	Sections	0.26	58	36	400	250	4360-40- B, C	17000 R St 37.2
A 572 Gr 42	Sections	0.21	60	42	415	290	-43-A, B, C	St 44.2
A 572 Gr 50	Sections	0.23	65	50	450	345	-50-A, B, C	
A 36/572 Gr 50	Sections	0.22	65	50	450	345	-50-A, B, C	
A 53 Gr A	Pipes	0.25	48	30	330	207	3601-S 360	1629 St 37.0
A 53 Gr B	Pipes	0.30	60	35	415	240	430	44.0
A 501	Hollows	0.30	58	36	400	248	4360-40 B 43 D	17120 R St 37.2
	Sections							St 44.3

Note: Indicated tensile and yield strengths are the minimum figures.

Fuente: Rayaprolu, K. (2009)

Para el hogar de la caldera se toma el acero A106 Gr Grado B de la Tabla N° 23

este acero tiene una temperatura límite de 510 °C.

Tabla 23. características del acero.

Boiler Quality Pipes to American Specifications and Their Equivalent BS and DIN Standards										
American Specifications (SA)								British Equivalent (BS)	German Equivalent (DIN 17175)	
Nominal Specifications		Temperature Limit (°C)	Tensile (kpsi)	Yield (kpsi)	Tensile (MPa)	Yield (MPa)	Use			
1. Carbon steel										
Medium tensile										
106 Gr B	C(<0.30)*	510	60	35	414	241	1, 2, 3	3602 CFS 460		St 45.8
High tensile										
106 Gr (°C)	C(<0.35)*	510	70	40	482	276	1, 2, 3			
2. Low-alloy steel										
335 P1	C-½ Mo	468	55	30	379	207	2, 3	S1 243		15 M03
335 P12	C-½ Mo	566	60	30	414	207	1			
335 P11	1¼% Cr-½ Mo	566	60	30	414	207	1, 2, 3	3604 CFS 620		13CrMo44
335 P22	2¼% Cr-1% Mo	593	60	30	414	207	1, 2, 3	3604 CFS 622		10CrMo9 10
3. High-alloy steel										
335 P91	9Cr-1Mo-V	649	85	60	586	414	1, 2, 3	3604-2 Gr 91		X10CrMoV Nb9-1
Note: In the column pertaining to use, 1 refers to furnace walls exposed to high heat, 2 refers to ECON and other enclosures not exposed to high heat, and 3 refers to SH and RH.										
* Limited to a temperature of 427°C (800°F) and for pipes outside of boiler setting for fear of graphitization by steam.										

Fuente: Rayaprolu, K. (2009)

Espesor de la pared de la caldera

Para determinar el espesor de la pared del cilindro se determina primero la presión máxima dentro del caldera. Conociendo que el interior del tanque estará bajo una presión manométrica de 5 bar y la presión hidrostática del agua lo cual aumentará la presión especialmente en el fondo de la caldera, se tiene que la presión interna de diseño.

Presión interna de diseño

Como se mencionó la presión interna de diseño es la suma de presión manométrica y el máximo valor de la presión hidrostática en el fondo del tanque.

$$P = P_{man} + \rho gh$$

Donde:

ρ : Densidad del agua =

g : Aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

h : Altura del líquido en el tanque = 1.8 m

Reemplazando se tiene:

$$P = (5 \times 10^5 \text{ Pa}) + \left(966.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (1.8 \text{ m}) = 517.07 \text{ KPa} = 74.99 \text{ PSI}$$

Para el esfuerzo circunferencial

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

Para el esfuerzo longitudinal

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.4P}$$

Donde:

t : Espesor de la pared

P : Presión interna de diseño = $517.07 \text{ KPa} = 74.99 \text{ psi}$

R : Radio interno del cilindro = 0.6 m

S : Esfuerzo máximo permisible = $400 \text{ MPa} = 58 \text{ kpsi}$ (ASTM A36 - Tabla 5.13)

E : Eficiencia de la unión = 0.85

$$t = \frac{(517.07 \text{ KPa})(0.6)}{(400 \times 10^3 \text{ KPa})(0.85) - 0.6(517.07 \text{ KPa})} = 0.9133 \text{ mm}$$

$$t = \frac{(517.07 \text{ KPa})(0.6)}{2(400 \times 10^3 \text{ KPa})(0.85) - 0.4(517.07 \text{ KPa})} = 0.4564 \text{ mm}$$

Como se aprecia en los cálculos el espesor mínimo requerido por norma es bastante bajo.

Cálculo de la vida útil

Según el código ASME la velocidad mínima de corrosión de acero al carbono es 0.127 mm/año entonces tenemos.

$$\text{vida util} = \frac{\text{espesor de la tuberia}(\text{mm})}{\text{corrosion de la tuberia} \left(\frac{\text{mm}}{\text{año}}\right)}$$

Para una vida útil de 30 años el espesor debe ser:

$$\text{espesor de la tubería} = (30 \text{ años}) \left(0.127 \frac{\text{mm}}{\text{año}} \right) = 3.81 \text{ mm}$$

Sumando los espesores, se tiene:

$$t = 0.9133 \text{ mm} + 3.81 \text{ mm} = 4.7233 \text{ mm}$$

Redondeando el resultado se decidió utilizar una plancha de 5 mm de espesor.

Peso Total:

$$P_{\text{caldera}} = P_{\text{agua}} + P_{\text{tubos}} + P_{\text{coraza}} + P_{\text{quemador}}$$

Peso del agua:

El agua de la caldera cubrirá completamente los tubos, así que el agua tendrá una altura de 2 m desde el fondo de la caldera. Calculando la densidad del agua a la temperatura promedio entre 23 y 151.83 °C, se tiene que la densidad es $966.74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$:

$$P_{\text{agua}} = \pi \cdot R_{\text{cald}}^2 \cdot L_{\text{agua}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

$$P_{\text{agua}} = \pi (0.6 \text{ m})^2 (2 \text{ m}) \left(966.74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 21.451 \text{ KN}$$

Peso de los tubos:

En total se van a emplear 180 tubos A178 con una longitud de 1.8 m cada uno, sumando las longitudes y sabiendo que el peso lineal de dichos tubos es 2.51 kg/m el peso total de todos los tubos es:

$$P_{\text{tubos}} = (180)(1.8 \text{ m}) \left(2.51 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 7.978 \text{ KN}$$

Peso de la coraza:

La corza es un cilindro de 1.2 m de diámetro con una altura de 2.4 m y un espesor de pared de 5 mm.

$$P_{\text{coraza}} = (2(\pi R_{\text{cald}}^2) + 2R_{\text{cald}}L_{\text{cald}})(t \cdot \rho_{\text{acero}}g)$$

$$P_{\text{coraza}} = (2(\pi(0.6 \text{ m})^2) + 2(0.6 \text{ m})(2.4 \text{ m}))(0.005 \text{ m}) \left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 1.980 \text{ kN}$$

Peso del quemador

Del catalogo se sabe que la masa es 67 kg.

$$P_{quemador} = (67 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 657.27 \text{ N}$$

$$P_{caldera} = 21.451 \text{ KN} + 7.978 \text{ KN} + 1.980 \text{ kN} + 0.6573 \text{ KN} = 173.77 \text{ KN}$$

El peso critico es:

$$P_{cr} = f_{seguridad} \cdot P_{caldera}$$

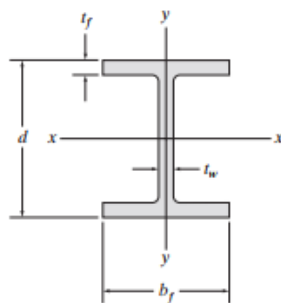
$$P_{cr} = 5(173.77 \text{ KN}) = 868.85 \text{ KN}$$

$$P_{cr,viga} = \frac{P_{cr}}{4} = 217.21 \text{ KN}$$

$$I = \frac{P_{cr,viga} * H^2}{E_{acero} * \pi^2}$$

$$I = \frac{(217210 \text{ N}) * (0.1575 \text{ m})^2}{(207 \times 10^9) * \pi^2} = 2.64 \times 10^{-9} \text{ mm}^4 =$$

De la imagen siguiente se toma el perfil W6X20 para el soporte de la caldera



Secciones I de ala ancha o perfiles W						Unidades PLS					
Designación	Área <i>A</i>	Peralte <i>d</i>	Grosor del alma <i>t_w</i>	Ala		Eje x-x			Eje y-y		
				anchura <i>b_f</i>	grosor <i>t_f</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>
pulg × lb/pie	pulg ²	pulg	pulg	pulg	pulg	pulg ⁴	pulg ³	pulg	pulg ⁴	pulg ³	pulg
W12 × 87	25.6	12.53	0.515	12.125	0.810	740	118	5.38	241	39.7	3.07
W12 × 50	14.7	12.19	0.370	8.080	0.640	394	64.7	5.18	56.3	13.9	1.96
W12 × 45	13.2	12.06	0.335	8.045	0.575	350	58.1	5.15	50.0	12.4	1.94
W12 × 26	7.65	12.22	0.230	6.490	0.380	204	33.4	5.17	17.3	5.34	1.51
W12 × 22	6.48	12.31	0.260	4.030	0.425	156	25.4	4.91	4.66	2.31	0.847
W12 × 16	4.71	11.99	0.220	3.990	0.265	103	17.1	4.67	2.82	1.41	0.773
W12 × 14	4.16	11.91	0.200	3.970	0.225	88.6	14.9	4.62	2.36	1.19	0.753
W10 × 100	29.4	11.10	0.680	10.340	1.120	623	112	4.60	207	40.0	2.65
W10 × 54	15.8	10.09	0.370	10.030	0.615	303	60.0	4.37	103	20.6	2.56
W10 × 45	13.3	10.10	0.350	8.020	0.620	248	49.1	4.32	53.4	13.3	2.01
W10 × 39	11.5	9.92	0.315	7.985	0.530	209	42.1	4.27	45.0	11.3	1.98
W10 × 30	8.84	10.47	0.300	5.810	0.510	170	32.4	4.38	16.7	5.75	1.37
W10 × 19	5.62	10.24	0.250	4.020	0.395	96.3	18.8	4.14	4.29	2.14	0.874
W10 × 15	4.41	9.99	0.230	4.000	0.270	68.9	13.8	3.95	2.89	1.45	0.810
W10 × 12	3.54	9.87	0.190	3.960	0.210	53.8	10.9	3.90	2.18	1.10	0.785
W8 × 67	19.7	9.00	0.570	8.280	0.935	272	60.4	3.72	88.6	21.4	2.12
W8 × 58	17.1	8.75	0.510	8.220	0.810	228	52.0	3.65	75.1	18.3	2.10
W8 × 48	14.1	8.50	0.400	8.110	0.685	184	43.3	3.61	60.9	15.0	2.08
W8 × 40	11.7	8.25	0.360	8.070	0.560	146	35.5	3.53	49.1	12.2	2.04
W8 × 31	9.13	8.00	0.285	7.995	0.435	110	27.5	3.47	37.1	9.27	2.02
W8 × 24	7.08	7.93	0.245	6.495	0.400	82.8	20.9	3.42	18.3	5.63	1.61
W8 × 15	4.44	8.11	0.245	4.015	0.315	48.0	11.8	3.29	3.41	1.70	0.876
W6 × 25	7.34	6.38	0.320	6.080	0.455	53.4	16.7	2.70	17.1	5.61	1.52
W6 × 20	5.87	6.20	0.260	6.020	0.365	41.4	13.4	2.66	13.3	4.41	1.50
W6 × 16	4.74	6.28	0.260	4.030	0.405	32.1	10.2	2.60	4.43	2.20	0.966
W6 × 15	4.43	5.99	0.230	5.990	0.260	29.1	9.72	2.56	9.32	3.11	1.46
W6 × 12	3.55	6.03	0.230	4.000	0.280	22.1	7.31	2.49	2.99	1.50	0.918
W6 × 9	2.68	5.90	0.170	3.940	0.215	16.4	5.56	2.47	2.19	1.11	0.905

Fuente: Mecánica de materiales 8 Ed- Hibbeler

Anexo N° 10

Selección de equipos, ablandador, gasificador y scrubber

Selección de ablandador:

- **Determinar el caudal a tratar:** La capacidad del caldero es de 30 BHP, esta capacidad debe transformarse a galones por hora.

$$\text{GAL/H} = \text{CAPACIDAD} \times 4.14$$

$$GAL/H=30*4.14$$

$$GAL/H=124.2$$

- 4.14= Rata de evaporación de caldero.

$$1BHP=34.5 \text{ Lb/h}$$

$$1 \text{ gal evaporación/hora}=8.34\text{lb/h}$$

$$GPH = \frac{34.5 \text{ Lb/h}}{8.34 \text{ Lb/h}} = \mathbf{4.14}$$

- Como el caldero opera en el rango de 8 a 10 horas, se considera el rango máximo de 10 horas entonces tenemos:

$$124.2*10=1240.2 \text{ GPH}$$

- Para determinar la dureza total: para determinar la dureza del agua de alimentación del caldero es de 850 ppm, pero hay que convertir a GPG (granos por galón).

$$GPG = \frac{DUREZA}{17.1}$$

$$GPG = \frac{850}{17.1} = 4.71$$

Para encontrar los GPG que hay que remover por día se aplicó el siguiente calculo que considera un margen de error entre el rango de 5% al 15% por la cual se optó por el rango del 10% entonces se tendrá:

$$\frac{GPG}{dia} = GPH * GPG$$

$$\frac{GPG}{dia} = 1240.2 * 4.71 = 61650.34$$

$$61650.34 * 1.10 = 67815.4 \text{ GPG}$$

- Para determinar el volumen del ablandador se tiene:

Tabla 24. Variación de resina y consumo de salmuera.

Salmuera (lb)	Resina (granos)	Características
6	20000	Ahorra sal, pero se regenera con más frecuencia
9	25000	Consumo normalmente usado
12	28000	Mayor consumo pero menos regeneración.

Fuente: Elaboración propia

Dato: un saco de resina catiónica tiene 25000 granos/pie³.

$$\text{volumen del ablandador} = \frac{\text{GPG}}{25000 \text{ gr resina/ft}^3}$$

$$\text{volumen del ablandador} = \frac{67815.4}{25000 \text{ gr resina/ft}^3}$$

$$\text{volumen del ablandador} = 2.71 \text{ ft}^3$$

De acuerdo al cálculo se tendrá que seleccionar un ablandador de acuerdo al mercado y se tendrá que optar por un ablandador de 3 pie³.

De acuerdo a la capacidad de los ablandadores, y considerando 9lb de sal por cada regeneración tendremos el tiempo de regeneración para cada ablandador.

Tabla 25. Regeneración de Resina.

Ablandador en ft ³	formula	Días
1	25000 granos/7060 granos/día	3.56
1.5	37500 granos/7060 granos/día	5.34
2	50000 granos/7060 granos/día	7.12
2.5	52500 granos/7060 granos/día	8.9
3	75000 granos/7060 granos/día	10.68

Fuente: Elaboración propia

La dureza del agua está determinada por la cantidad de sales de calcio y magnesio que contiene, a mayor sea este contenido mayor dureza, la cual causara incrustaciones. (abarca, 2013).

Tabla 26. clasificación de la dureza del agua

Granos por galón [gpg]	Dura/suave
Menos de 1	Suave
1 – 3,5	Ligeramente Dura
3,5 – 7,0	Moderadamente Dura
7.0 – 10,5	Dura
10,5 o más	Muy Dura
30 o más	Extremadamente Dura

Fuente: <https://vde.com.mx>

Figura N°10

Ficha técnica: Ablandador.



Diametro de Tanque FRP

14" - 63"

Disponible en Fibra Polímero Reforzado [FRP]

Especificaciones de Operación		
<ul style="list-style-type: none"> Conexiones de la válvula: soldadura hembra o conexión de brida opcional Caudal más lento por Ft3 = Mejor filtración Temperatura máxima: 140 ° F (60 ° C) Presión de trabajo: 150 psi (10 bar) para el tanque y 100 psi para el sistema general 	<ul style="list-style-type: none"> Los caudales / rangos de flujo de servicio recomendados se basan en el Ft3. Del tanque / lecho filtrante 2 GPM / Ft3. = Mínimo "reblandecimiento superior" (<0,15 grano (3 ppm) de fugas de dureza), <2 psi gota 3,5-5 GPM / Ft3. = Ablandamiento de grado medio (hasta 1 grano (17 ppm) de fugas de dureza), <5 psi Fuga de dureza de <3 ppm (0,2 granos) @ 6 libras de NaCl, y <1 ppm (0,1 granos) @ 12 libras de NaCl. 	<ul style="list-style-type: none"> 5-10 GPM / Ft3 = Ablandamiento de la utilidad Las velocidades de retro lavado permiten una expansión del lecho del 50% a 60 ° F. Los caudales máximos se basan en 10 GPM / Ft3. O > 12 psi, lo que ocurra primero Capacidad basada en 23 granos (400 ppm) de dureza como CaCO3 a 2 a 4 GPM / Ft3. (Relación de CaCO3 a Mg de 2 a 1)

Figura 10. Ficha técnica de tanque

Selección del gasificador:

Datos:

PCIcarbón=27000kj/kg

n= 1.20 (factor de seguridad)

$$Q_t = m_{cble} * PCI * n \text{ (kw)}$$

$$Q_t = 0.0158 * 27000 * 1.20 \text{ (kw)}$$

$$Q_t = 511.92 \text{ (kw)}$$

Selección de gasificador QM1-1.6, con el cual se detalló un cálculo para poder hallar la potencia y se compare con la potencia anterior que la necesita la caldera.

Datos:

PCIcarbón=5540 kJ/kg

n= 1.20 (factor de seguridad)

$m_{cble} = 320 \text{ kg/h}$

$$Q_t = \frac{320}{3600} * 5540 * 1.20 \text{ (kw)}$$

$$Q_t = 590.93 \text{ kw}$$

Ficha técnica: Gasificador de carbón. Qm1-1.6

Tabla 27. ficha técnica del gasificador de carbón

Model	QM1-0.8	QM1-1.0	QM1-1.3	QM1-1.5	QM1-1.6	QM1-1.8	QM1-2.0
Hearth inside diameter mm	800	1000	1300	1500	1500	1800	2000
Furnace sectional area m²	0.5	0.785	1.326	1.77	2.01	2.54	3.14
Water jacket heating area m²	3.76	6.84	8.98	12.37	13.06	15.82	18.84
Ash layer height mm	100-300	100-300	100-300	100-300	100-300	100-300	100-300
Applicable coal	Non-caking or weakly caking bituminous coal; coal quality should be coincident with GB9143 Standard for coal quality of coal gasifier with fixed - bed.						
Coal size mm	13-25, 25-50, 50-100						
Coal consumption kg/h	≤60	≤130	≤200	≤300	≤350	≤450	≤600
Gasifying agent	Air+steam						
Air consumption m³/kg(coal)	2.2-2.8	2.2-2.8	2.2-2.8	2.2-2.8	2.2-2.8	2.2-2.8	2.2-2.8
Steam consumption kg/kg (coal)	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5
Gas output Nm³/h	≤230	≤500	≤750	≤1100	≤1500	≤1680	≤2180
Calorific value of coal gas kJ/m³	5020-6060	5020-6060	5020-6060	5020-6060	5020-6060	5020-6060	5020-6060
Gas outlet pressure kpa	< 0.6	< 0.8	< 0.8	< 0.98	< 0.98	< 0.98	< 0.98
Gas outlet temperature °C	400-550						
Max.bottom blast pressure kpa	1.6	2	2.45	2.45	2.45	3.5	3.5
Saturated air temperature °C	50-65						

Slag discharge mode	Wet type; discharge slag internally;						
Steam output kg/h	38	80	130	180	180	250	300
Steam pressure MPa	0.294						
Coal Feeding mode	Manually; Automatically						
Drive device of stoker	Water seal single bell jar	Double bell jar	Double bell jar	Double bell jar	Double bell jar	Double bell jar	Double bell jar
Ash tray rotation speed r/h	3	2.87	2.76	2.76	2.76	2.23	2.23
Ash tray motor power kw	0.75	0.75	1.5	2.2	2.2	2.2	2.2
Coal bucket elevator motor power kw	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Fan power	0.75	1.5	2.2	3	3	4	5.5
Customization is available---your inquiry for other models will be really expected; we can customize proper machine according to your requirements.							

Tabla 28. composición del gasificado.

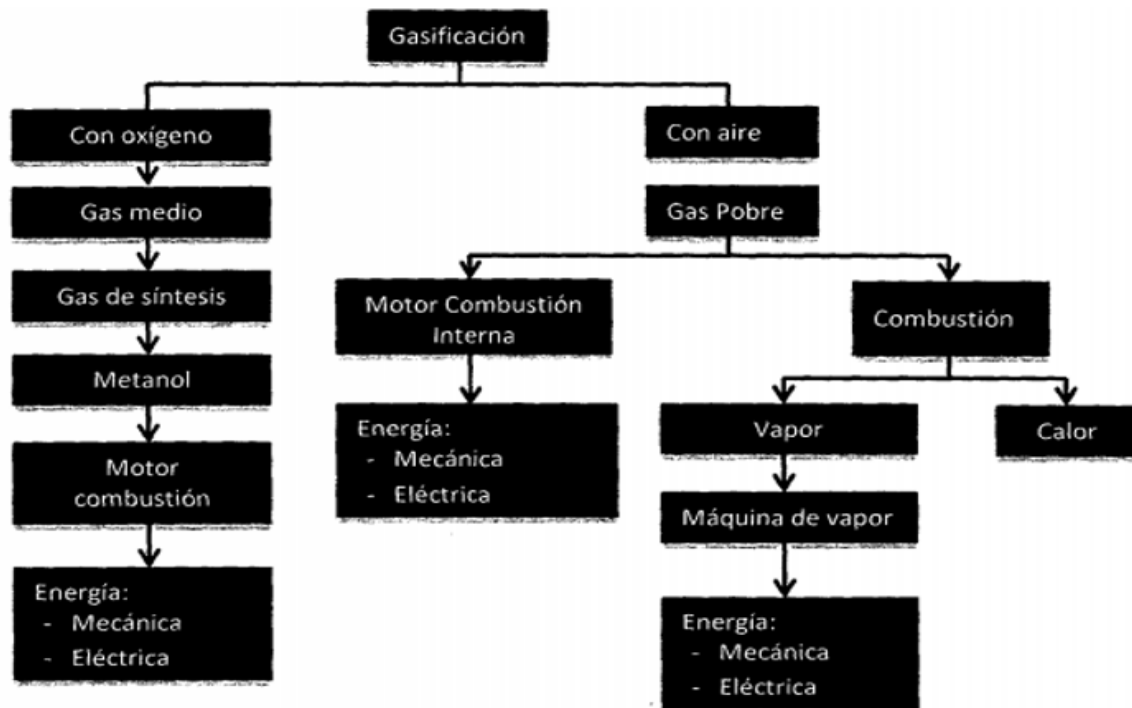


Figura N°13: esquema del proceso de gasificación

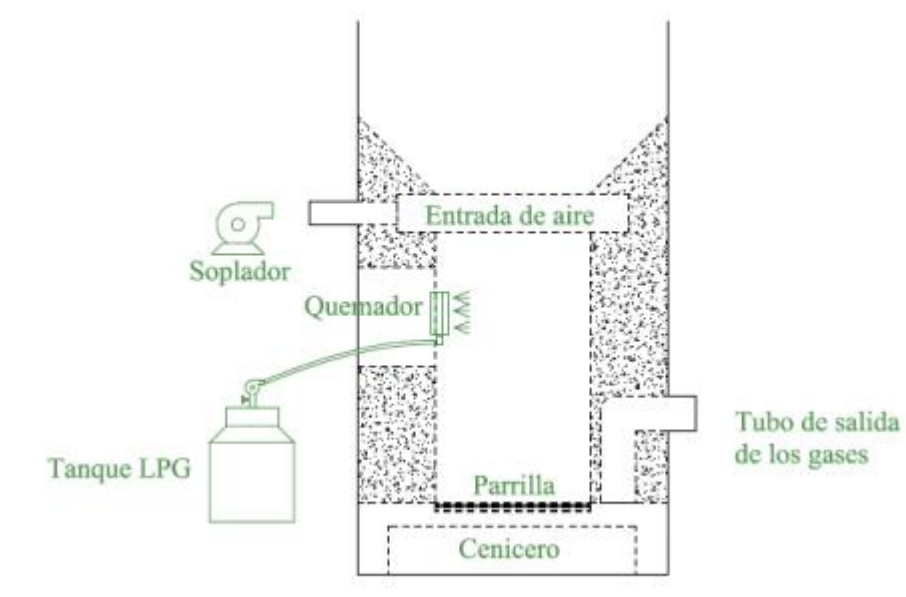


Figura 11. Gasificador

Tabla N° 29

Tabla 29. ficha técnica de quemadores

Modelo	Kcal/h	Consumos de GLP kg/h	Consumos de metano m3/h
F5/2-CE	Min 20.000 - Max 50.000	1,66 - 4,16	2,35 - 5,88
F8/2-CE	Min 35.000 - Max 80.000	2,91 - 6,66	4,11 - 9,41
FL15/2-CE	Min 60.000 - Max 150.000	5,00 - 12,50	7,05 - 17,64
FL20/2-CE	Min 100.000 - Max 200.000	8,33 - 16,66	11,76 - 23,52
FL30/2-CE	Min 130.000 - Max 300.000	10,83 - 25,00	15,29 - 35,29
FP45/2-CE	Min 100.000 - Max 450.000	8,33 - 37,50	11,76 - 52,94
FP65/2-CE	Min 116.000 - Max 650.000	9,66 - 54,16	13,64 - 76,47
FP100/2-CE	Min 172.000 - Max 1.000.000	14,33 - 83,33	20,23 - 117,64
FP150/2-CE	Min 206.000 - Max 1.300.000	17,16 - 108,33	24,23 - 152,94
FP180/2-CE	Min 900.000 - Max 1.900.000	75,00 - 158,33	105,88 - 223,52

Fuente: <http://www.bruciatorisantin.com/es/quemadores-industriales/bruciatori-monoblocco-a-gas-bistadio/>

Anexo N° 12

SELECCION DE CAPACIDAD DE LA ELECTROBOMBA

Si se conoce la capacidad de la caldera se aplica la fórmula:

$$\frac{lbs}{hr} = 2 * 15.6 * BHP$$

$$\frac{lbs}{hr} = 2 * 15.6 * 30$$

$$\frac{lbs}{hr} = 936$$

CENTRÍFUGAS: 2 TURBINAS CONTRAPUESTAS

(A)



Características:

Bombas centrífugas con dos turbinas contrapuestas, especialmente aptas para formar equipos de presión, al conseguir elevados caudales a presiones altas, de gran utilidad para usos industriales, riegos por aspersión, y otros usos generales.

Temperatura del agua máxima: 90° C. (excepto modelo 1 C.V., 50°C.).

Construcción:

Cuerpo de bomba y soporte en fundición, eje de acero inoxidable. Turbina en latón (modelo 1 C.V. en noryl), cierre mecánico en grafito. Bajo demanda en WIDIA y SIC.

Motor:

Motor eléctrico cerrado con ventilación externa. En la versión monofásica incorpora protector térmico y condensador permanente. Protección **IP 44**. En versión trifásica, motor a inducción con protección a cargo del usuario.

Presión máxima admitida: 10 bar. (excepto modelo 1 C.V., de 6 bar)

Dos turbinas en bronce

Modelo	C.V.	Precio
<i>Monofásicas (230 V)</i>		
AM 36/15	0,8	290
AM 42/15	1	360
AM 52/20	1,5	490
AM 62/20	2	540
<i>Trifásicas (230/400 V)</i>		
AT 42/15*	1	360
AT 52/20	1,5	475
AT 62/20	2	520
AT 68/30	3	530
AT 72/30	4	970
AT 97/40	5,5	1.005
AT 101/50	7,5	1.280
CBT 800	7,5	1.760
CBT 1000	10	1.840
CBT 1500	15	2.115

Modelo bomba		Potencia		Amperios			Caudal litros/hora														Ø Diametro	
				Monof.	Trifásico		0	900	1.200	1.500	1.800	2.700	3.000	3.600	4.200	4.800	6.000	7.500				
Monof.	Trifásico	C.V.	KW.	230	230	400	Altura en metros														Asp.	Envío
AM 36/15		0,8	0,55	5			36	33	32	30	28	26	23	18	15				1"	1"		
AM 42/15	AT 42/15	1	0,74	5,4	4,3	2,4	45	44	43	42	41	38	37	33	28	23			1"	1"		
AM 52/20	AT 52/20	1,5	1,1	10,2	5,8	4,1	54	53	52	51	50	49	48	46	45	44	40		1 1/4"	1"		
AM 62/20	AT 62/20	2	1,5	11,5	7,8	4,8	59	58	57	56	55	54	53	52	50	49	44	38	1 1/4"	1"		

Fuente: <http://www.agpbombas.com/catalogo.pdf>

Anexo N°13

Tabla N° 30

lavadores de gases (scrubber)

Tabla 30. Ficha técnica del scrubber.

Hoja de especificaciones:

Modelo	Volumen de aire (m & sup3;/h)	Tamaño de la Torre (mm)	Tamaño del tanque de agua (mm)	Espesor (mm)	Potencia de la bomba (kw)	Tuyere tamaño (mm)
YT-04PL600	1500	600*2800	500*400*450	PP-A/6	0,75	Y phi; 200
YT-04PL650	2000	650*3000	500*400*450	PP-A/6	0,75	Y phi; 250
YT-04PL800	3000	800*3600	500*400*450	PP-A/6	1,5	Y phi; 315
YT-04PL900	4000	900*3600	500*400*450	PP-A/6	1,5	Y phi; 315
YT-04PL1000	5000	1000*3600	600*400*450	PP-A/6	1,5	Y phi; 400
YT-04PL1100	6500	1100*3800	600*400*450	PP-A/8	2,2	Y phi; 400
YT-04PL1200	8000	1200*4200	600*400*450	PP-A/8	2,2	Y phi; 450
YT-04PL1400	10000	1400*4200	600*400*450	PP-A/8	2,2	Y phi; 500
YT-04PL1500	13000	1500*4200	600*400*450	PP-A/8	3	Y phi; 500
YT-04PL1650	15000	1650*4200	600*500*450	PP-A/8	3	Y phi; 600
YT-04PL1800	18000	1800*4500	600*500*450	PP-A/10	5,5	Y phi; 650
YT-04PL2000	20000	2000*4500	700*500*500	PP-A/10	5,5	Y phi; 700
YT-04PL2200	22000	2200*4500	800*600*500	PP-A/10	7,5	Y phi; 800
YT-04PL2400	25000	2400*5000	1000*600*500	PP-A/10	7,5	Y phi; 800
YT-04PL2600	30000	2600*5000	1000*600*500	PP-A/10	7,5	Y phi; 1000
YT-04PL2800	35000	2800*5000	1200*600*500	PP-A/10	11	Y phi; 1000
YT-04PL3000	40000	3000*5000	1200*600*500	PP-A/12	11	Y phi; 1000
YT-04PL3300	45000	3300*5500	1500*600*500	PP-A/12	15	Y phi; 1200

Fuente:<https://spanish.alibaba.com/product-detail/plastic-scrubber-equipment-waste-gas-scrubber-6210>

Figura N°14: Scrubber

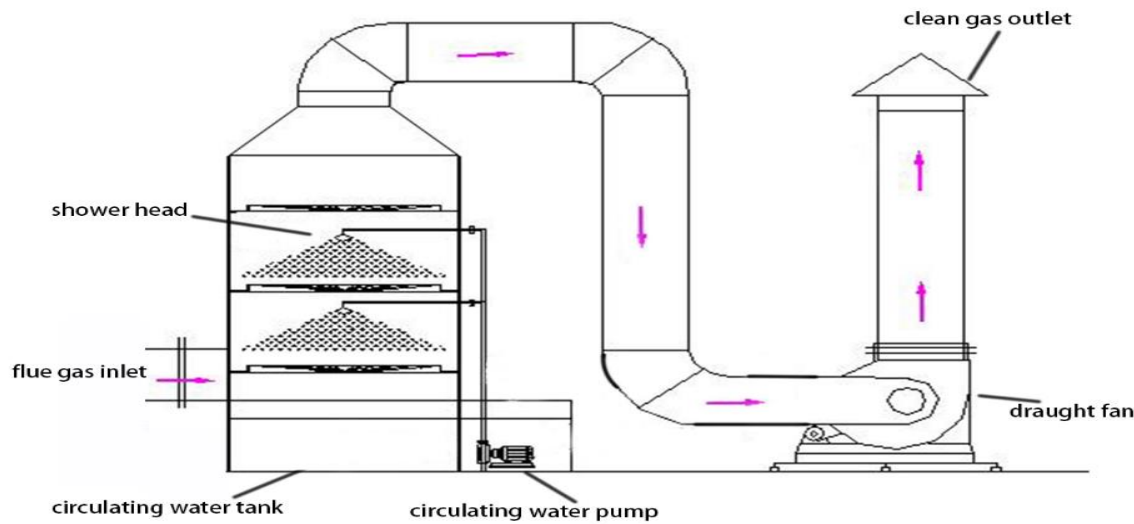


Figura 12. ciclo de quemado.

Fuente:<https://spanish.alibaba.com/product-detail/plastic-scrubber-equipment-waste-gas-scrubber-6210>

Anexo N°14

Tabla 31. Quemadores de Combustible para caldera

TECHNICAL DATA								
MODEL			RS 34 MZ		RS 44 MZ		RS 44 MZ	
TYPE			883 T		884 T		884 T	
OUTPUT (1)	2nd stage	kW	125 - 390		203 - 550		203 - 550	
		Mcal/h	108 - 336		175 - 473		175 - 473	
min. 1st stage		kW	45		80		80	
		Mcal/h	39		69		69	
FUEL			NATURAL GAS: G20 - G21 - G22 - G23 - G25					
			G20		G25		G20	
			G25		G20		G25	
- net calorific value		kWh/Sm ³	9.45	8.13	9.45	8.13	9.45	8.13
		Mcal/Sm ³	8.2	7.0	8.2	7.0	8.2	7.0
- absolute density		kg/Sm ³	0.71	0.78	0.71	0.78	0.71	0.78
- max delivery		Sm ³ /h	41	48	58	67.6	58	67.6
- pressure at max. delivery (2)		mbar	13.1	18.4	16.7	23.2	16.7	23.2
OPERATION			* Intermittent (min. 1 stop in 24 hours) * Two-stage (high and low flame) and one-stage (all - nothing) Boilers: water, steam, diathermic oil					
STANDARD APPLICATION								
AMBIENT TEMPERATURE		°C	0 - 40					
COMBUSTIVE AIR TEMPERATURE		°C max	60					
ELECTRICAL SUPPLY		V Hz	230 - +/-10% 50/60 - single-phase				230 - 400 with neutral - +/-10% 50/60 - three-phase	
ELECTRICAL MOTOR		rpm W V	2800/3400 300 220 - 240		2820/3400 420 220 - 240		2820/3400 450 220/240-380/415	
ACCELERATION CURRENT		A	15		17		14 - 10	
OPERATION CURRENT		A	3.2		3.5		2 - 1.4	
MOTOR CAPACITOR		mF/V	12.5/400		12.5/425		-	
IGNITION TRANSFORMER		V1 - V2 I1 - I2	230 V - 1 x 15kV 1 A - 25mA					
ELECTRICAL POWER CONSUMPTION		W max	600		700		800	
NOISE (3)	SOUND PRESSURE	dBA	68		70		70	
	SOUND POWER		79		81		81	

(1) Reference conditions: Room temperature 20°C - Gas temperature 15°C - Barometric pressure 1013 mbar - Altitude 0m above sea level.
(2) Socket pressure 7(A)p.4 with zero pressure in the combustion chamber.
(3) Noise emission tests carried out as specified in EN 15036-1 with measurement accuracy $\sigma = \pm 1.5$ dB, in the manufacturer's combustion chamber with burner operating on test boiler at maximum output.

Tabla 32. características técnicas de quemador

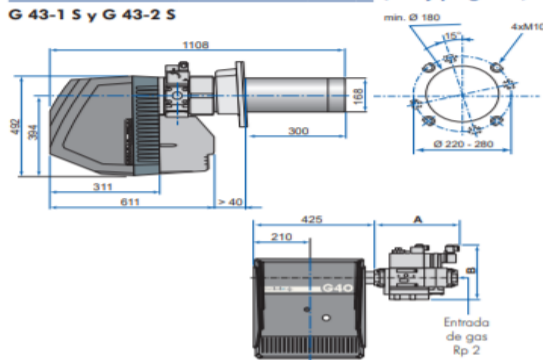
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Modelo - Modulante para regulación DIEMATIC-m Delta o DIEMATIC-m 3		G 43-1 S	G 43-2 S	G 43-3 S
Potencia nominal	kW	205 a 590	220 a 720	345 a 1030
Alimentación		monofásica	trifásica	trifásica
Caudal a gas natural H (1))	m³/h	21,7 a 62,4	23,3 a 76,2	36,5 a 109,0
Pudiendo equipar las calderas tipo	GT 400	409, 410, 411	412	413, 414
	GTE 500	507, 508	509, 510	511 a 516
Pre-regulación (potencia de suministro de la caldera) mín./máx.	kW	260/415	315/550	410/695
Caudal de gas pre-regulado con gas natural H mín./máx.	m³/h	27,5/43,9	33,3/58,2	43,4/73,5
Presión de gas pre-regulada con gas natural H mín./máx.	mbar	2,2/5,6	3,0/8,3	1,8/6,2
Potencia nominal del motor a 2850 rpm	W	750	1500	2200
Potencia máx. absorbida	W	1300	1350	2450
Nivel acústico a 1 m	dB(A)	69	70	79
Peso de expedición	kg	67	68	78

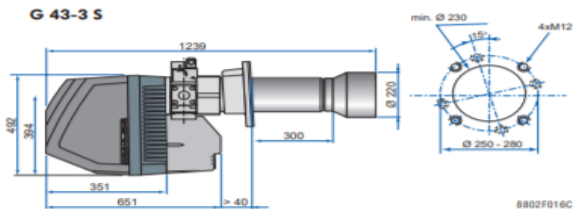
(1) a 15 °C - 1013 mbar

DIMENSIONES PRINCIPALES (mm y pulgadas)

G 43-1 S y G 43-2 S



G 43-3 S



8802F016C

G 40 con rampa DMV VEF	512	520	525
A	310	310	270
B	250	285	380

Fuente: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/81422/300014060.p

df

Figura N°15: Quemador.

DESCRIPCIÓN

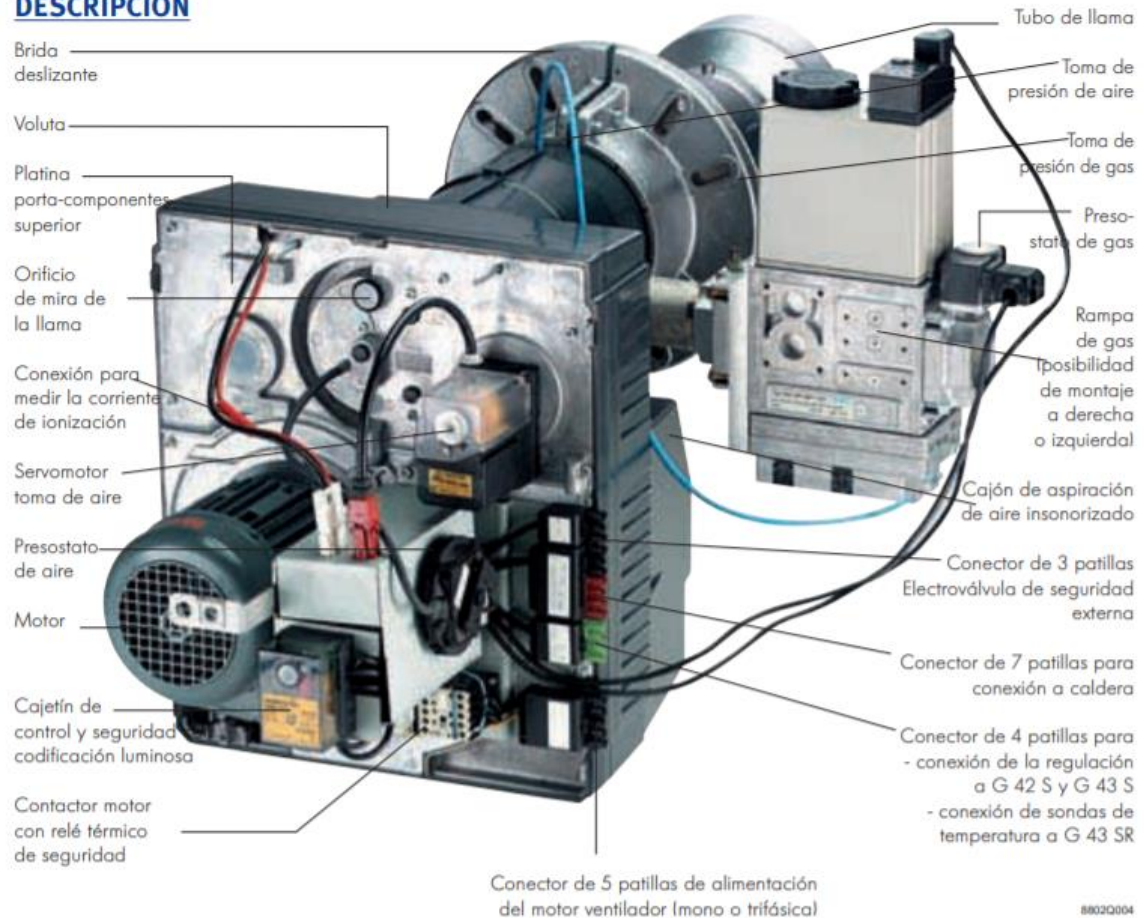


Figura 13. quemador

Fuente: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/81422/300014060.p](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/81422/300014060.pdf)

df

Anexo N° 15

NORMATIVIDAD PARA DISEÑO DE CALDERAS

Las normas ASME ha emitido un documento denominado, ASME BOILER AND PRESSUREVESSEL CODE, que se detalla las secciones para recipientes a presión:

Tabla N° 32

Tabla 33. parámetros de normas ASME en la pg5

SECCION I:	Calderas de potencia
SECCION II	Especificación de materiales
SECCION III	Calderas nucleares.

SECCION IV	Calderas de calentamiento.
SECCION V A VIII	Recipientes a presión.
SECCION IX	Calefacción de soldadura

Fuente: Elaboración propia

PARAMETROS DE NORMAS ASME EN LAS PG5 Y PG9, DETERMINAN LOS MATERIALES A USAR SEGÚN SU APLICACIÓN:

A. PARA CAMARA DE FUEGO, PLACA Y CASCO:

Tabla N°33

MATERIAL	APLICACIÓN
SA.202	Planchas de acero al cromo-magnesio-silicio, para calderas y recipientes a presión.
SA.203	Planchas de acero níquel para calderas
SA.285	Planchas de acero al carbono, de baja o intermedia resistencia para cajas de fuego y para bridas.
SA.299	Planchas de acero al carbono-manganeso-silicio, de altas resistencias para calderas y recipientes a presión.
SA.515	Planchas de acero al carbono de resistencia intermedia para calderas soldadas fusión u otros recipientes.

Fuente: Elaboración propia

B. PARA TUBOS DE FUEGO Y TUBERIAS DE CALDERA:

Tabla N° 34

MATERIAL	DOMINACION
SA.53	para tuberías de acero con o sin costura
SA.105	acero forjado para brida y conexiones
SA.106	Tubería de acero al carbono para servicio de alta temperatura
SA.178	Tubos de acero al carbono electrosoldado para caldera , es igual ASTM 178
SA.192	tubos de acero al carbono para caldera SIN costura para el servicio de alta presión..

SA.209	tubos de acero al carbono-molibdeno para calderas y sobre calentadores.
SA.206	Tubos de acero al carbono electrosoldado para calderas y sobre calentadores a alta presión.

Fuente: Elaboración propia

C. PARA CALDERAS PIROTUBULARES:

Las normas ASME para calderas de según su rango de potencia.

Tabla N°35

Potencia(BHP)	Diámetro de coraza (PULG)
De 20 a 60	42
De 60 a 100	48
De 100 a 150	60
De 150 a 225	64
De 225 a 350	76
De 350 a 400	82
De 400 a 600	88

Fuente: Elaboración propia

D. **NORMATIVA PERUANA:** Para calderas de baja y alta presión en base de normas ASME.

Tabla N°36

Calderas Industriales	5	NTP 350.300:2008	CALDERAS INDUSTRIALES. Procedimiento para la determinación de la eficiencia térmica de calderas industriales.	2008.10.26
	6	NTP 350.301:2008	CALDERAS INDUSTRIALES. Estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado.	2009.02.04
	7	NTP 350.302:2009	EFICIENCIA ENERGÉTICA. Calderas industriales. Proyecto de instalación de calderas con reducción de emisiones. Requisitos básicos.	2009.11.07
	8	NTP 350.303:2010	CALDERAS INDUSTRIALES. Inspección de las instalaciones con fines de eficiencia energética y reducción de emisiones.	2010.04.16

Fuente: ministerio de energía y minas Perú

Anexo N° 15

Anexo 02: registró de datos

MUESTRA	HORA	TEMP. VAPOR (°C)	PRESION VAPOR (BAR)	TEMP. COMBUSTION (°c)	TEMP. AMBIENTE (°c)	TEMP. AGUA (°c)
1	8:00 a. m.	176.9	2.5	218	23.9	27.3
2	8:10 a. m.	165.6	2.4	222	25.3	25.4
3	8:20 a. m.	173.7	2.6	216	22.4	23.6
4	8:30 a. m.	168.4	2	218	24.3	27.6
5	8:40 a. m.	174.6	2	230	23.2	26.5
6	8:50 a. m.	172.4	2.3	237	24.4	25.6
7	9:00 a. m.	166.7	2.5	249	25.6	25
8	9:10 a. m.	174.3	2.4	236	22.9	24.9
9	9:20 a. m.	169.6	2.6	222	23.7	25.2
10	9:30 a. m.	168.4	2.4	219	22.6	25.4
11	9:40 a. m.	167.3	2.4	224	23.2	24.8
12	9:50 a. m.	182.5	2.5	225	24.2	23.9
13	10:00 a. m.	178.3	2.6	233	24.3	25.4
14	10:10 a. m.	179.4	2.6	237	23	25.6
15	10:20 a. m.	169.6	2.5	230	22.8	24.7
16	10:30 a. m.	176.4	2.6	220	21.8	23.8

17	10:40 a. m.	168.7	2.6	232	22.6	25.3
18	10:50 a. m.	165.4	2.7	223	22.3	26.4
19	11:00 a. m.	171.3	2.5	226	24.3	26.3
20	11:10 a. m.	168.4	2.6	233	22.6	25.8
21	11:20 a. m.	171.2	2.4	229	21.8	25.6
22	11:30 a. m.	169.4	2.5	232	23.2	25.4
23	11:40 a. m.	172.4	2.6	220	23.4	25.9
24	11:50 a. m.	169.6	2.5	220	23.2	26.3
25	12:00 p. m.	174.3	2.7	220	23.2	26.2
MEDIANA		178.3	2.6	233	24.3	25.4
MODA		168.4	2.6	220	23.2	25.4
RANGO		17.1	0.7	33	3.8	4
PROMEDIO		171.792	2.48	226.84	23.368	25.516

Fuente: Elaboración propia

Anexo N° 16

Formatos de Protocolo de Toma de Datos:

Fecha: 25 / 11 / 19

Ubicación de la toma de datos:
Empresa Sandoval - El Milagro

Operador:
Armando Ruiz

Instrumento:
Pirómetro

Marca:
CPS Temp-Sec Ker

Serie:
TMINI R

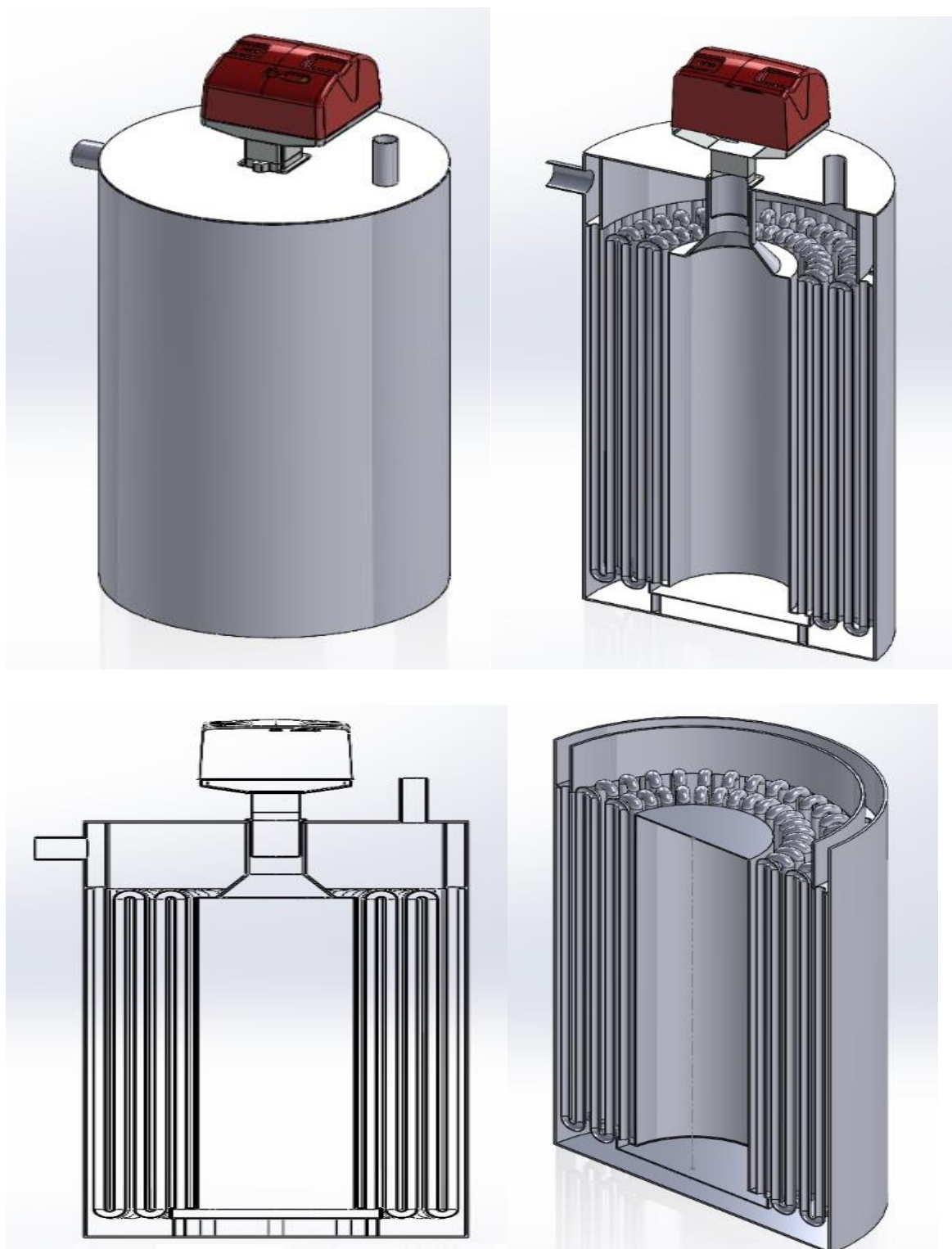
Parámetro a Medir:
Temperatura del hogar

Hora de toma del dato:
8:10 A.M

Dato obtenido:
500 °C

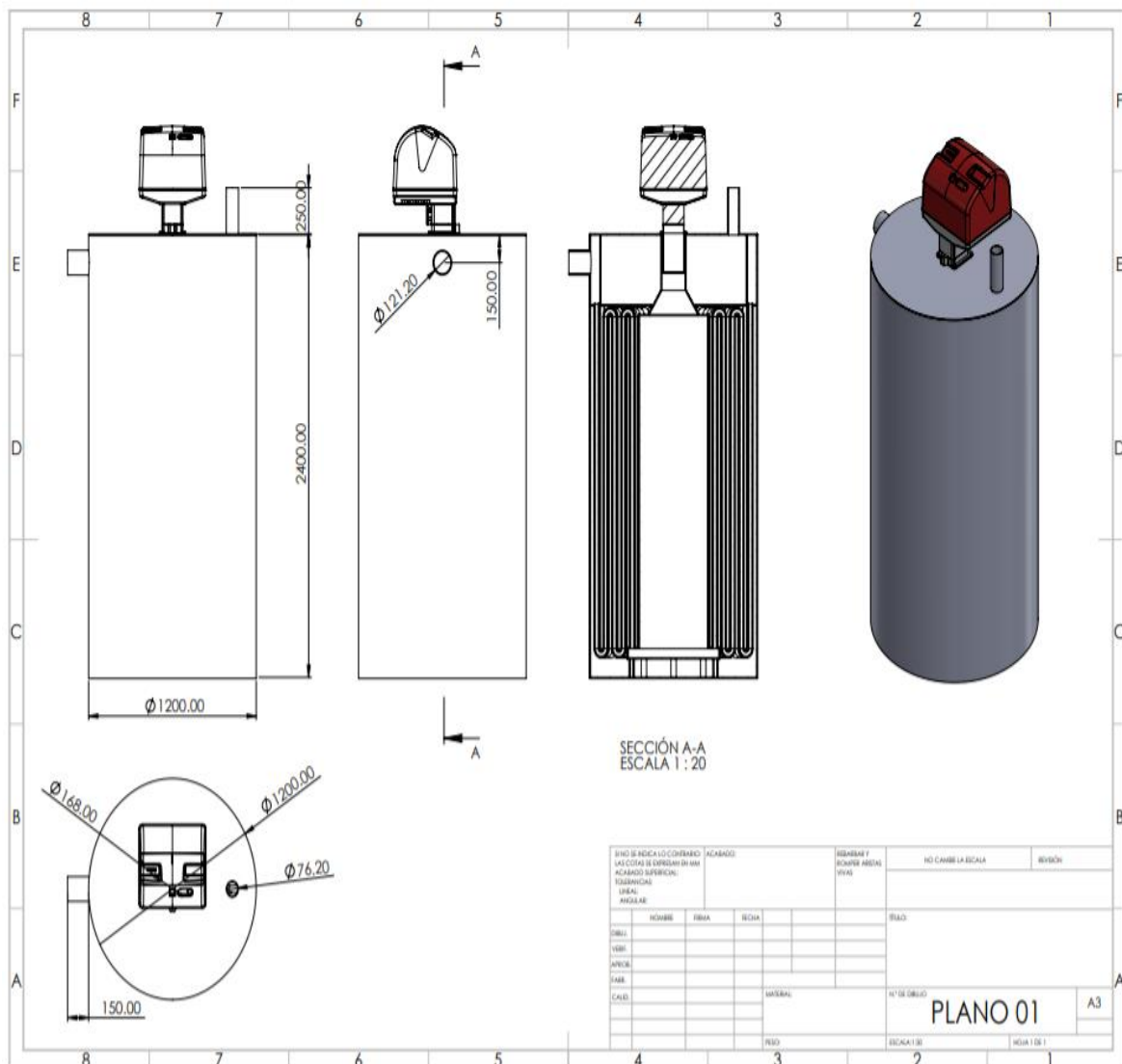
Anexo N° 17

Diseño en solidworks de caldera pirotubular vertical.



Fuente: Elaboración propia

Planos de caldera pirotubular vertical .



Fuente: Elaboración propia

Anexo N°17

Tabla N° 37

Propiedades termofísicas de los gases de combustión

Tabla: Propiedades físicas de los gases de combustión a p = 101325 Pa, con composición volúmica de los gases CO ₂ =13%; H ₂ O=11%; N ₂ = 76%									
t [°C]	T (K)	ρ [Kg/m ³]	Cp [KJ/Kg*°K]	h(kJ/kg)	k*10 ² [W/m*°K]	a*10 ² [m ² /h]	μ*10 ⁶ [N*s/m ²]	ν *10 ⁶ [m ² /s]	Pr
0	273.15	1.30	1.05	0.00	2.28	6.08	15.78	12.20	0.72
80	353.15	1.02	1.06	85.41	2.96	10.10	19.47	19.67	0.70
100	373.15	0.95	1.07	106.76	3.13	11.10	20.39	21.54	0.69
180	453.15	0.7884	1.0910	196.8560	3.8355	16.3000	23.6754	30.5480	0.6740
200	473.15	0.75	1.10	219.38	4.01	17.60	24.50	32.80	0.67
289.61	532.76	0.6699	1.1119	289.2727	4.5045	22.1065	26.7235	40.5553	0.6581
300	573.15	0.62	1.12	336.63	4.84	25.16	28.23	45.81	0.650
350	623.15	0.57	1.14	398.60	5.27	30.10	29.96	53.10	0.65
400	673.15	0.53	1.15	460.56	5.70	35.04	31.69	60.38	0.640
415	688.15	0.51	1.16	480.34	5.83	36.33	33.51	62.77	0.64
500	773.15	0.46	1.18	592.45	6.56	43.61	43.85	76.30	0.63
515	788.15	0.45	1.19	612.86	6.69	45.22	42.96	78.90	0.63
600	873.15	0.41	1.21	728.52	7.42	54.32	37.87	93.61	0.62
620	893.15	0.40	1.22	756.32	7.59	56.69	38.43	97.31	0.62
700	973.15	0.36	1.24	867.51	8.27	66.17	40.69	112.10	0.61
735	1008.15	0.35	1.25	917.91	8.58	70.69	41.63	119.00	0.61
800	1073.15	0.33	1.26	1011.52	9.15	79.09	43.38	131.80	0.60
822	1095.15	0.32	1.27	1044.31	9.34	82.12	43.94	136.35	0.60
900	1173.15	0.30	1.29	1160.55	10.01	92.87	45.91	152.50	0.59
943	1216.15	0.29	1.30	1223.22	10.39	99.90	46.97	161.87	0.59
1000	1273.15	0.28	1.31	1306.30	10.90	109.21	48.36	174.30	0.58
1085	1358.15	0.26	1.32	1432.95	11.62	122.10	50.36	193.68	0.57
1100	1373.15	0.26	1.32	1455.30	11.75	124.37	50.71	197.10	0.57
1165	1438.15	0.25	1.33	1554.40	12.31	135.36	52.19	212.64	0.56
1200	1473.15	0.24	1.34	1607.76	12.62	141.27	52.99	221.00	0.56
1273	1546.15	0.23	1.35	1723.22	13.33	154.97	54.85	240.38	0.55
1300	1573.15	0.22	1.36	1765.92	13.59	160.04	55.54	247.55	0.55
1350	1623.15	0.21	1.37	1846.86	14.07	169.43	56.80	260.83	0.55
1400	1673.15	0.20	1.38	1927.80	14.56	178.82	58.07	274.11	0.54
1422	1695.15	0.20	1.38	1964.23	14.77	182.95	58.63	279.95	0.54
1500	1773.15	0.18	1.40	2093.40	15.53	197.61	60.61	300.67	0.53
1548	1821.15	0.17	1.40	2174.67	15.99	206.73	61.83	313.42	0.53
1600	1873.15	0.16	1.41	2262.72	16.49	216.61	63.15	327.23	0.52
1605	1878.15	0.16	1.42	2271.37	16.54	217.54	63.28	328.56	0.52
1700	1973.15	0.15	1.43	2435.76	17.46	235.19	65.69	353.79	0.51

Fuente: Raúl Paredes – Centrales de Producción de Energía 2016

Anexo N° 16

Tabla N° 38

Ficha técnica de pernos de anclaje.

SAE: Society of Automotive Engineers			
NUMERO DE GRADO	MATERIAL	CARGA DE PRUEBA (KPSI)	ESFUERZO DE RUPTURA (KPSI)
1 , 2	Acero de bajo carbono ó acero al carbono	55 - 33	74 - 60
5	Acero al carbono, templado y revenido	85 - 74	120 - 105
5.2	Acero de bajo carbono martensítico, templado y revenido	85	120
7	Acero al carbono aleado, templado y revenido	105	133
8	Acero al carbono aleado, templado y revenido	120	150
8.2	Acero de bajo carbono martensítico, templado y revenido	120	150

Fuente: casa del perno

Anexo N° 17



